



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

**VYUŽITÍ POLARIZACE SVĚTLA PŘI FILTRACI OPTICKÉHO
SIGNÁLU**

UTILIZATION OF LIGHT POLARIZATION WHEN FILTERING THE OPTICAL SIGNAL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Alexa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

BRNO 2018

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektronika a sdělovací technika**

Ústav radioelektroniky

Student: Bc. Jan Alexa

ID: 98277

Ročník: 2

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Využití polarizace světla při filtraci optického signálu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se se základními parametry laserového záření a s jevem polarizace optické vlny. Nastudujte způsob modelování polarizačních vlastností optického záření a optických prvků. Navrhněte metodu měření stavu polarizace optického záření šířícího se volným prostorem po jeho zavedení do vlákna. Uveďte souvislost polarizace optické vlny s disperzí a dělením signálů podle polarizace.

Sestavte měřicí řetězec pro měření vlivu polarizace optické vlny na energetické vlastnosti signálu a šumu v optickém vláknu. K propojení jednotlivých prvků a částí měřícího řetězce zvolte optimální konektory. Změřte vliv teplotní a mechanické nestability na polarizaci optické vlny a navrhněte způsob stabilizace polarizace optické vlny. Zvažte využití polarizace vlny k oddělení optického signálu od optického šumu v optickém přijímači.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] SALEH, B. E. A. Základy fotoniky. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6

[2] DERICKSON, d. Fiber Optic Test and measurement. Upper Saddle River (USA): Pearson Education, 1997. ISBN10: 0135343305

Termín zadání: 5. 2. 2018

Termín odevzdání: 17. 5. 2018

Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

Konzultant: Ing. Martin Kyselák, Ph.D. (Univerzita obrany)



prof. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato diplomová práce pojednává o možnosti oddělení užitečného signálu od šumu při využití polarizace laserového záření. Práce je strukturovaná do 5 tematických celků, z nichž první je zaměřen na laserové záření a vlastnosti. Druhá část je podrobněji zaměřena na polarizaci záření, její popis a možnosti měření stavu polarizace. Třetí část práce je věnována návrhu měřicích řetězců a seznámení s použitými prvky v měřicích řetězcích. Kapitola čtvrtá obsahuje měření stavu polarizace a jeho výsledky. V poslední kapitole jsou vyhodnoceny jednotlivé výstupy měřicích řetězců dle jejich spektrálních charakteristik.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizace, EDFA, šum, optická vlákna, měření OSNR, spektrální charakteristika

ABSTRACT

This master thesis deals with the possibility of separation of useful signal from noise using polarization of laser radiation. This thesis is structured into 5 thematic units. The first unit is focused on laser radiation and its properties. The second part contains a deeper focus on the polarization of radiation, its description and the possibilities of measuring the polarization states. The third part of the thesis is devoted to the design of the measuring chains and identification of used elements. Chapter four contains measurement of status of the polarization and its results. The last chapter analyzes particular measuring chains outputs according to their spectral characteristics.

KEYWORDS

Polarization, EDFA, noise, optical fiber, OSNR measurement, spectral characteristic

ALEXA, J. *Využití polarizace světla při filtraci optického signálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2018. 53 s., 8 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji diplomovou práci na téma Využití polarizace světla při filtraci optického signálu jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce, panu prof. Ing. Otakarovi Wilfertovi, CSc., za umožnění práce na projektu, cenné rady, poskytnuté podněty a připomínky a odborné vedení při zpracování této práce. Dále panu Ing. Martinovi Kyselákovi, Ph.D. (Univerzita obrany) za zapůjčení komponent pro měřicí řetězce a odborné konzultace. Poděkování patří také panu Ing. Peterovi Barčíkovi, Ph.D. za užitečné rady a konzultace k praktické části diplomové práce

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072
Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

OBSAH

1	Laserové záření	2
1.1	Princip laseru	2
1.1.1	Podmínky vzniku oscilací	2
1.1.2	Složení oscilátoru	3
1.2	Vlastnosti laserového záření	3
1.2.1	Výkon	3
1.2.2	Spektrální složení	4
1.2.3	Prostorové rozdělení optické intenzity	5
1.2.4	Polarizace	6
2	Polarizace optické vlny	7
2.1	Druhy polarizace	7
2.2	Zdroje polarizovaného záření	7
2.2.1	Stupeň polarizace	9
2.3	Poincarého sféra	9
2.4	Měření polarizace optického záření	10
2.5	Polarizační vidová disperze a její stabilizace	12
2.5.1	Optická kompenzace polarizační vidové disperze	13
2.5.2	Optoelektronická kompenzace polarizační vidové disperze	13
2.5.3	Elektronická kompenzace polarizační vidové disperze	14
3	Měřicí řetězce	15
3.1	Zdroj polarizovaného laserového záření	15
3.2	Polarizaci zachovávající optická vlákna (PM fiber)	16
	Využití konektory pro optická vlákna	18
3.3	Vláknový zesilovač	20
3.4	Optický filtr	21
3.4.1	Braggova mřížka	23
3.5	Lineární vláknový polarizátor a vláknový dělič svazku	23
3.6	Třílopatkový polarizační kontrolér	24
3.7	Polarimetr	25
3.8	Optický spektrální analyzátor	26

3.9	Zapojení měřicích řetězců.....	27
4	Měření stavu polarizace	30
4.1	Záření vystupující z laserové diody	30
4.2	Záření za pevným atenuátorem.....	32
4.3	Záření za lineárním polarizátorem.....	33
4.4	Záření procházející EDFA zesilovačem	35
4.5	Výstupní záření dle druhého měřicího řetězce	36
4.6	Výstupní záření získané na měřicím řetězci podle varianty č. 3	38
5	Měření spektrálních charakteristik	41
5.1	Záření laserové diody.....	41
5.2	EDFA zesilovač	42
5.3	Výsledky měření na jednotlivých měřicích řetězcích.....	43
6	Závěr	49

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1 Základní schéma laseru.....	2
Obrázek 1-2 Znázornění ustáleného výkonu poklesem zisku na hodnotu ztrát	3
Obrázek 1-3 Jednorozměrné Gaussovo rozložení optické intenzity.....	4
Obrázek 1-4 Podmínky pro dosažení oscilací laseru	5
Obrázek 1-5 Výstupní záření příčného modu (0, 0)	6
Obrázek 2-1 Princip polarizátoru.....	8
Obrázek 2-2 Poincarého sféra s vyznačenými některými možnými stavy polarizace....	10
Obrázek 2-3 Polarimetr využívající prostorové dělení paprsku	11
Obrázek 2-4 Polarimetr využívající časového dělení paprsku.....	11
Obrázek 2-5 Znázornění PMD v optickém vlákne	12
Obrázek 2-6 Principiální schéma optického PMD kompenzátoru.....	13
Obrázek 2-7 Optoelektronický PMD kompenzátor	14
Obrázek 2-8 Elektronický PMD kompenzátor	14
Obrázek 3-1 Laserová dioda SFL1550P	15
Obrázek 3-2 Spektrální charakteristika laserové diody udávaná výrobcem.....	16
Obrázek 3-3 Příklady PM optických vláken.....	17
Obrázek 3-4 PM vlákno typu panda - zobrazení rychlé a pomalé osy	17
Obrázek 3-5 PM vlákno - zobrazení při správném a vyoseném vstupu	18
Obrázek 3-6 Konektor typu FC	18
Obrázek 3-7 Konektor typu SC	19
Obrázek 3-8 Konektor typu LC	19
Obrázek 3-9 Broušení ferule PC konektoru.....	19
Obrázek 3-10 Broušení ferule APC konektoru.....	20
Obrázek 3-11 Správné zapojení konektorů, vlevo APC, vpravo PC	20
Obrázek 3-12 Detail nesprávného zapojení konektorů PC s APC.....	20
Obrázek 3-13 - EDFA zesilovač	20
Obrázek 3-14 Použitý EDFA zesilovač	21
Obrázek 3-15 Princip cirkulátoru	21
Obrázek 3-16 Použitý optický cirkulátor.....	22
Obrázek 3-17 Laditelný optický filtr	22

Obrázek 3-18 Princip Braggovy vláknové mřížky	23
Obrázek 3-19 Lineární vláknový polarizátor	24
Obrázek 3-20 Princip děliče/slučovače svazku s PM vlákny	24
Obrázek 3-21 Třílopatkový polarizační kontrolér	25
Obrázek 3-22 Polarimetr od firmy Thorlabs.....	26
Obrázek 3-23 Optický spektrální analyzátor Newport MIR8025	26
Obrázek 3-24 Referenční měřicí řetězec využívající pouze spektrální filtraci a s polarizací nezachovávajícími vlákny (var. 1).....	27
Obrázek 3-25 Měřicí řetězec s PM vlákny využívající pouze polarizační filtraci (var. 2)	28
Obrázek 3-26 Měřicí řetězec s PM vlákny využívající jak polarizační, tak spektrální filtraci (var. 3)	28
Obrázek 3-27 Mikroskop FIP-400 Viewer od výrobce EXFO	29
Obrázek 3-28 Znečištěný (vlevo) a očištěný (vpravo) konektor PM vlákna typu Panda	29
Obrázek 4-1 Zobrazení stavu polarizace záření LD na Poincarého kouli	30
Obrázek 4-2 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou – výstup LD	31
Obrázek 4-3 Grafický výstup polarimetru znázorňující normované Stokesovy parametry	31
Obrázek 4-4 Zobrazení stavu polarizace záření po průchodu pevným attenuátorem na Poincarého kouli	32
Obrázek 4-5 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou – výstup ATT	32
Obrázek 4-6 Změřené normované Stokesovy parametry záření za pevným attenuátorem	33
Obrázek 4-7 Zobrazení stavu polarizace záření po průchodu polarizátorem na Poincarého kouli	34
Obrázek 4-8 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou za lineárním polarizátorem	34
Obrázek 4-9 Změřené normované Stokesovy parametry záření za lineárním polarizátorem	34
Obrázek 4-10 Zobrazení stavu polarizace záření na výstupu měřicího řetězce zapojeného podle varianty č. 2 (polarizační filtrace) na Poincarého kouli	36
Obrázek 4-11 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou na výstupu měřicího řetězce zapojeného podle varianty č. 2	37
Obrázek 4-12 Změřené normované Stokesovy parametry záření na výstupu měřicího řetězce zapojeného podle varianty č. 2	37
Obrázek 4-13 Zobrazení stavu polarizace výstupního záření 3. řetězce (spektrální i	

polarizační filtrace) na Poincarého kouli	38
Obrázek 4-14 Zobrazení polarizace záření mezi vertikální a horizontální osou na výstupu 3. měřicího řetězce	38
Obrázek 4-15 Změřené normované Stokesovy parametry záření na výstupu 3. měřicího řetězce	39
Obrázek 4-16 Kontrolní zobrazení stavu polarizace výstupního záření 3. řetězce na Poincarého kouli	39
Obrázek 5-1 Spektrální charakteristika záření LD	41
Obrázek 5-2 Spektrální charakteristika samotného EDFA zesilovače (bez zesilovaného záření)	42
Obrázek 5-3 Spektrální charakteristika změřena na výstupu referenčního měřicího řetězce (podle obr. 3-24)	43
Obrázek 5-4 Spektrální charakteristika polarizačně filtrovaného měřicího řetězce (zapojení podle obr. 3-25).....	44
Obrázek 5-5 Spektrální charakteristika spektrálně a polarizačně filtrovaného měřicího řetězce (podle obr. 3-26)	45
Obrázek 5-6 Kontrolní spektrální charakteristika na výstupu polarizačně a spektrálně filtrovaného měřicího řetězce	46
Obrázek 5-7 Porovnání spektrálních charakteristik na výstupech všech tří měřicích řetězců (viz obr. 3-24, 3-25 a 3-26)	47

Seznam tabulek

Tabulka 1 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup LD	31
Tabulka 2 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup ATT	33
Tabulka 3 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup lineárního polarizátoru	35
Tabulka 4 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup měřicího řetězce (var. 2)	37
Tabulka 5 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup měřicího řetězce (var. 3)	40
Tabulka 6 Výsledné hodnoty získané měřením	47

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá základními parametry laserového záření a jeho šířením v optických vláknech. Detailní zaměření je na polarizaci optické vlny. Smyslem práce je měření polarizačního stavu optické vlny a studium možnosti oddělení užitečného záření od šumu. Tento experiment vede k řešení společenské poptávky, kterou je přenos času.

V první kapitole jsou popsány laserové zdroje základní vlastnosti laserového záření. Druhá kapitola pojednává o samotné polarizaci optické vlny. Je zde popsán vznik polarizované vlny, možné stavy polarizované vlny a jejich měření. Třetí kapitola je věnována návrhu měřicí soustavy a podrobnému popisu použitých komponent. Pro podrobné zkoumání byly navrženy 3 měřicí řetězce. V měřicích řetězcích je kladen důraz na správný výběr všech komponent. Pro správnost měření je třeba využít takové prvky, které při průchodu nezmění stav polarizace optické vlny.

Měřicí řetězce jsou v této práci navrženy tak, aby při následném sestavení a změření výkonových úrovní signálu a šumu bylo možné zjistit, zda má polarizační filtrace vliv na zlepšení odstupu signálu od šumu.

V experimentální části práce jsou měřeny parametry procházející optické vlny. Pozornost je věnována vlnové délce záření, šířce spektrální čáry, stavu polarizace optické vlny, výkonovým úrovním na koncích měřicích řetězců a hlavně měření OSNR. Použité měřicí přístroje jsou taktéž podrobně specifikovány.

Důležitou částí práce je rozbor vlivu EDFA zesilovače na přenášený signál a studium smyslu spektrální a polarizační filtrace pro zvýšení kvality konečného optického signálu. Pro spektrální filtraci byl použit optický cirkulátor, k němuž byla připojena Braggova mřížka, čímž vznikla optická pásmová propust. Jako polarizační filtr byl užit vláknový polarizační dělič svazku, který požadovanou rovinu polarizace procházejícího záření propustí a záření s jiným směrem vektoru šíření polarizace utlumí. Výsledky měření jsou zpracovány, rozebrány a komentovány v závěru této práce.

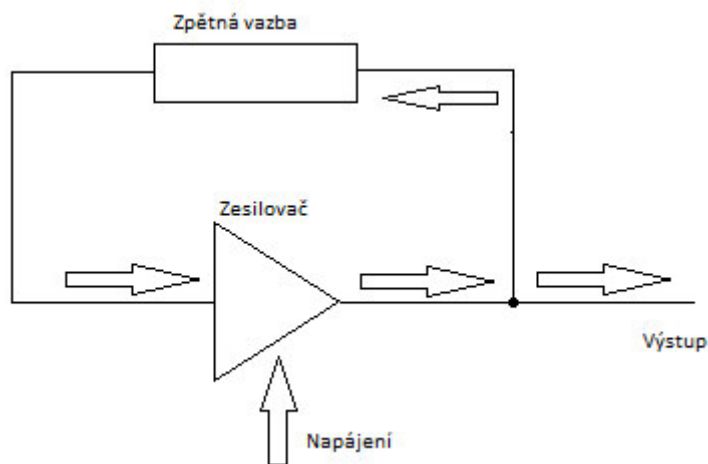
1 LASEROVÉ ZÁŘENÍ

Zdrojem laserového záření je LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Tento zdroj pracuje na principu zesílení světla stimulovanou emisí záření. Světlo vyzářené laserem je koherentní a monochromatické, protože je vyzářené ve formě úzkého svazku fotonů.

Laserové záření má velmi široké využití, především v různých vědeckých a technických aplikacích, v komunikační a počítačové technice, při zpracování obrazu, holografii, geologii, metrologii, při opracování materiálů a především v biologii a klinické medicíně.

1.1 Princip laseru

Laser je v podstatě optický oscilátor. Základem je rezonanční optický zesilovač. Výstupní signál se ze zesilovače, pomocí zpětné vazby, vrací sfázovaný na vstup. Schéma laseru je znázorněné na obrázku 1-1. V případě, že na vstupu není signál, pak je nulový signál také na výstupu a stejně tak je nulový signál zpětné vazby. Jedná se o nestabilní stav. Avšak i nepatrný, všudypřítomný šum, jehož frekvenční složky korespondují s frekvenčním pásmem zesilovače, dokáže proces oscilací vybudit. Vstupní signál šumu je zesílen, z výstupu přiveden zpětnou vazbou opět na vstup a následně znovu zesílen. Proces zvětšování signálu je limitován saturací zisku zesilovače. Tím je dosaženo ustáleného stavu a vzniká výstupní signál na rezonanční frekvenci zesilovače.



Obrázek 1-1 Základní schéma laseru

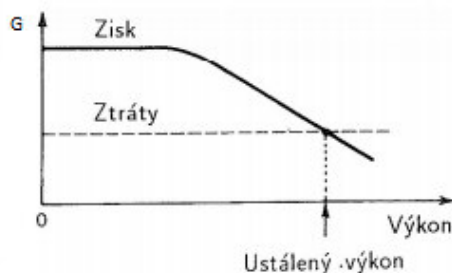
1.1.1 Podmínky vzniku oscilací

Hlavní podmínky vzniku oscilací jsou dvě:

- Zisk zesilovače musí být větší než ztráty systému zpětné vazby, takže při jednom oběhu smyčkou se zpětnou vazbou se dosahuje čistého zisku.

- Celková změna fáze při jednom oběhu musí být celočíselným násobkem 2π , takže signál zpětné vazby je sfázovaný s původním vstupním signálem. [1]

Splněním těchto dvou podmínek vzniká nestabilní systém a dochází k vzniku oscilací. Při rostoucím výkonu oscilací dojde k limitaci saturací zesilovače a zisk klesne pod svoji počáteční hodnotu. Až klesne zisk na hodnotu ztrát, je dosaženo stabilních podmínek (obr. 1-2)



Obrázek 1-2 Znárodnění ustáleného výkonu poklesem zisku na hodnotu ztrát, převzato z [1]

G zde značí funkci charakterizující výkon laserového záření.

Obě podmínky jsou však platné pouze pro jednu, nebo několik frekvencí (rezonanční frekvence oscilátoru), protože zisk i změna fáze jsou funkce frekvence.

1.1.2 Složení oscilátoru

Kompletní oscilátor je složen z následujících částí:

- Zesilovač s mechanismem saturace zesílení
- Systém zpětné vazby
- Mechanismus frekvenční selekce
- Zařízení pro vyvedení výstupního signálu

Jak již bylo zmíněno, laser je optický oscilátor. Zesilovačem oscilátoru je čerpané aktivní prostředí (pevné, kapalně i plynné). Základní vlastností laserových zesilovačů je saturace zisku. Umístíme-li aktivní prostředí do optického rezonátoru, ve kterém dochází k odrazům mezi zrcadly, získáme zpětnou vazbu. Frekvenční selekci zajistí rezonanční zesilovač a rezonátor, který připouští pouze určité mody. Pro vyvedení výstupního záření z rezonátoru musí být jedno z jeho zrcadel částečně propustné.

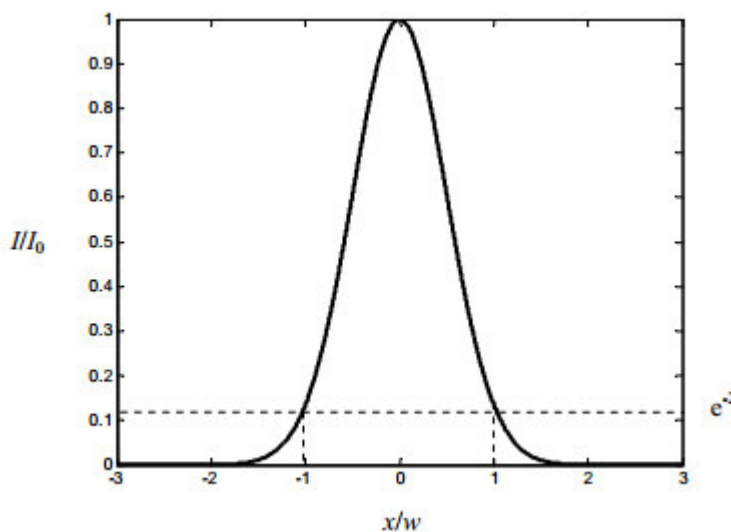
1.2 Vlastnosti laserového záření

1.2.1 Výkon

Hlavním parametrem pro vyjádření výkonu výstupního laserového záření je optická intenzita. Výstupní laserové záření má Gaussovo rozložení, tudíž lze určit i plochu. Optická intenzita Gaussova svazku je vyjádřena vztahem. [2]:

$$I(x, y, z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 e^{-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}} \quad (1.1)$$

Kde I_0 značí optickou intenzitu na ose svazku v počátku [$I_0 = I(0,0,0)$], w_0 je pološířka optického svazku v krčku, $w(z)$ je pološířka svazku závislá na souřadnici z . Rozložení optické intenzity v příčné rovině 0xy ($z = \text{konst.}$) je znázorněno na obrázku 1-3



Obrázek 1-3 Jednorozměrné Gaussovo rozložení optické intenzity, převzato z [2]

Rozložení optické intenzity na ose svazku je dáno vztahem [2]:

$$I(0,0,z) = I_0 \left[\frac{w_0}{w(z)} \right]^2 = \frac{I_0}{1 + \left(\frac{z}{z_0} \right)^2} \quad (1.2)$$

Ve vzdálenosti $z = z_0$ má normovaná optická intenzita poloviční hodnotu maxima. Jestliže $z \gg z_0$, pak platí [2]:

$$I(0,0,z) \approx I_0 z_0^2 \frac{1}{z^2} \quad (1.3)$$

Celkový optický výkon přenášený optickou vlnou s Gaussovým rozložením v rovině kolmé na směr šíření P_∞ je vyjádřen pomocí integrálu [2]

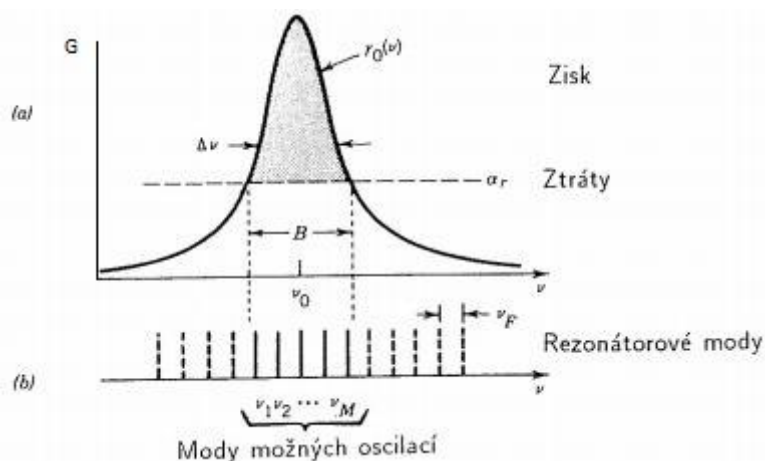
$$P_\infty = \int_0^\infty I(\rho, z) 2\pi\rho d\rho \quad (1.4)$$

kde ρ značí radiální vzdálenost bodu pozorování od osy svazku $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$. Integrací dojde ke zjednodušení vztahu [2]

$$P_\infty = \frac{1}{2} I_0 \pi w_0^2 \quad (1.5)$$

1.2.2 Spektrální složení

Spektrum záření generovaného laserem ovlivňují dva aspekty: tvar čáry atomového přechodu aktivního prostředí a mody rezonátoru. Toto vyplývá z obou podmínek vzniku oscilací laseru, znázorněných na obrázku 1-4:



Obrázek 1-4 Podmínky pro dosažení oscilací laseru, převzato z [1]

Obrázek 1-4 spojuje obě podmínky oscilací: a) podmínka vyžadující větší počáteční koeficient zesílení vůči ztrátám (tečkovaná oblast), G značí funkci tvaru spektrální čáry b) oscilace mohou nastat pouze uvnitř šířky rezonátorových módů (znázorněno čarami).

Počet možných módů laseru je dán vztahem [1]:

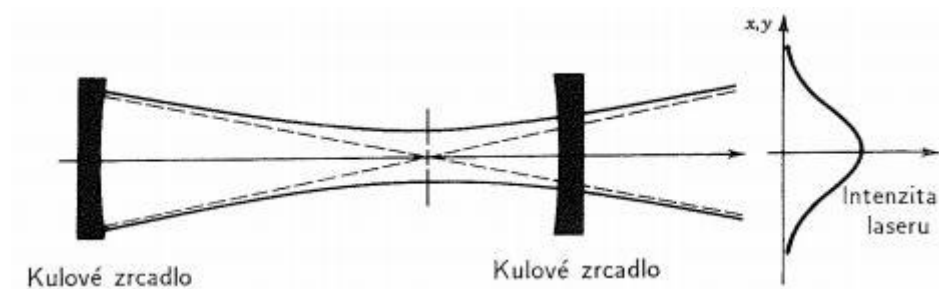
$$M \approx \frac{B}{\nu_F} \quad (1.6)$$

kde B je šířka spektrálního pásu okolo atomové rezonanční frekvence a $\nu_F = c/2d$ je přibližná vzdálenost mezi sousedními módy. V prostředí s nehomogenním rozšířením přechodu osciluje všech M módů (s různými výkony). V prostředí s homogenním rozšířením si módy do značné míry vzájemně konkurují, proto jsou ztížené podmínky pro současnou oscilaci více módů.

1.2.3 Prostorové rozdělení optické intenzity

Rozložení světla v prostoru závisí na tvaru aktivního prostředí a na geometrickém uspořádání rezonátoru. Při teoretickém popisu laseru se předpokládá, že rezonátor je tvořen dvěma rovnoběžnými, rovnými a nekonečně velkými zrcadly a celý prostor mezi nimi je vyplněn aktivním prostředím. V tomto ideálním stavu z laseru vystupuje ve směru osy rezonátoru rovinná vlna. Rezonátor s rovinnými zrcadly je však velmi citlivý na geometrické nastavení.

Obvykle je rezonátor laseru tvořen zrcadly kulovými. Laser se sférickými zrcadly v rezonátoru může generovat záření ve tvaru Gaussovského svazku. Rezonátor se sférickými zrcadly zajišťuje hierarchii mezi transversálními elektrickými a magnetickými módy. Nejčastěji je potřebný mód $(0, 0)$, který je nazýván Gaussovým módem. Tento mód je nejvíce soustředěný okolo optické osy a vykazuje nejmenší difrakční ztráty na okrajích zrcadel (má nejmenší průměr svazku a lze jej fokusovat na nejmenší plochu). Pro generování velkých optických výkonů jsou požadované oscilace v modech vyšších řádů.



Obrázek 1-5 Výstupní záření příčného modu $(0, 0)$, převzato z [1]

1.2.4 Polarizace

Každý mod (l, m, q) záření má dva stupně volnosti, které odpovídají dvěma nezávislým ortogonálním polarizacím. Obě polarizace jsou uvažovány jako dva nezávislé mody. V důsledku válcové symetrie rezonátorů s kruhovými zrcadly mají oba polarizační mody se stejnými hodnotami l a m stejné prostorové rozložení. Vedou-li vlastnosti rezonátoru a aktivního prostředí ke stejným hodnotám pro zesílení a ztráty u obou polarizací, laser bude oscilovat v obou modech současně, nezávisle a se stejnou intenzitou. Takové výstupní záření laseru je potom nepolarizované.[1]

2 POLARIZACE OPTICKÉ VLNY

Světlo je elektromagnetické vlnění, které lze popsat vektorem intenzity elektrického pole \mathbf{E} a vektorem indukce magnetického pole \mathbf{B} . Oba vektory jsou na sebe kolmé a leží v rovině, která je kolmá ke směru šíření vlnění. Spolu s vektorem ve směru šíření (tzv. Poyntingův vektor) tvoří pravotočivou soustavu.

Svazkem světla vedeme kolmou rovinu ke směru šíření. V případě nepolarizovaného záření má v každém bodě této roviny vektor \mathbf{E} jiný (nahodilý) směr. U polarizovaného záření mají vektory \mathbf{E} v této rovině stejný směr. Polarizace světla spadá do oblasti kvantové fyziky.

2.1 Druhy polarizace

V základu existují tři typy polarizace. Je-li směr vektoru \mathbf{E} neměnný, jedná se o polarizaci lineární. Mění-li se směr vektoru \mathbf{E} v čase, bude opisovat elipsu, tudíž je polarizace eliptická. Posledním typem je polarizace kruhová. Při kruhové polarizaci vektor \mathbf{E} opisuje kružnici. Plně polarizované záření má v podstatě eliptickou polarizaci. Lineární a kruhová polarizace jsou speciálními případy eliptické polarizace [3].

Matematicky lze polarizaci nejlépe popsat pomocí vektorů \mathbf{E} v soustavě xy : [3]

$$E_x = E_{0x} \cos(\tau + \delta_x) \text{ a } E_y = E_{0y} \cos(\tau + \delta_y) \quad (2.1)$$

kde $\tau = \omega t$, E_{0x} a E_{0y} jsou amplitudy a δ_x a δ_y jsou odpovídající fáze.

2.2 Zdroje polarizovaného záření

Polarizované záření lze získat několika způsoby. Nejznámější čtyři způsoby jsou:

- Odrazem
- Lomem
- Dvojlomem
- Polaroidem

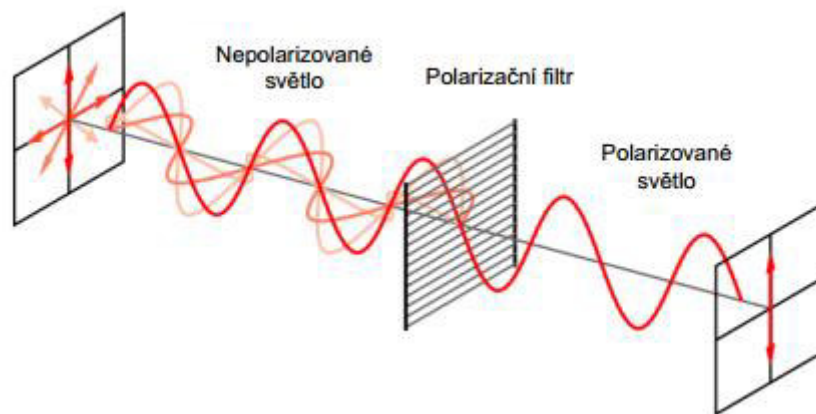
Dopadne-li nepolarizované světlo na rozhraní vhodného materiálu, je odražené světlo částečně polarizované, pak jeden směr vektorů \mathbf{E} převažuje. Při konkrétním úhlu, který je nazýván Brewsterovým úhlem, dochází k polarizaci úplné. Brewsterův úhel je závislý na indexu lomu prostředí, tím pádem také na vlnové délce.

Podobně jako při odrazu, dochází při lomu světla k částečné polarizaci. Avšak vždy se jedná pouze o polarizaci neúplnou.

Existují krystaly (např. islandský vápenec), které jsou anizotropní. Jejich optické vlastnosti závisí na směru procházejícího paprsku. Při dopadu světelného paprsku na tento krystal dojde k lomu na dva paprsky. První, tzv. řádný paprsek, se řídí zákony lomu (prochází jako by index lomu nezávisel na směru). Druhý, tzv. mimořádný paprsek, se

zákonem lomu neřídí (index lomu není konstantní, ale závislý na úhlu procházejícího mimořádného paprsku). Oba paprsky jsou lineárně polarizované, jejich vektory \mathbf{E} jsou na sebe kolmé.

Polaroid neboli polarizační filtr patří mezi tzv. absorpční polarizátory. Jeho základem jsou rovnoběžné podlouhlé molekuly (v praxi např. molekuly herpatitu). Toto uspořádání si lze zjednodušeně představit jako plaňkový plot. Při průchodu záření tímto prostředím projde pouze ta část záření, jehož vektor \mathbf{E} je rovnoběžný s osami molekul. Zbytek záření je absorbován.



Obrázek 2-1 Princip polarizátoru, převzato z [4]

.Stokesovy parametry

Měření elektrického pole světelného záření není příliš vhodné a v některých případech částečně polarizovaného světla to může být problém. Z tohoto důvodu byly vyvinuty metody pro vyjádření polarizace za pomoci lehce měřitelných optických výkonů. Jednou z široce využívaných pomůcek je Stokesův vektor. Jedná se o pole hodnot optického výkonu, kde jednotlivé prvky popisují optický výkon v konkrétních stavech polarizace. Pole má následující tvar:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

kde každý prvek reprezentuje optický výkon a má následující význam polarizace: LH (lineární horizontální), LV (lineární vertikální), RC (pravotočivá kruhová) a LC (levotočivá kruhová).

Význam prvků pole je následující:

S_0 je celkový výkon (polarizovaného i nepolarizovaného záření).

S_1 je výkon skrze LH polarizátor – výkon skrze LV polarizátor

S_2 je výkon skrze $L +45^\circ$ polarizátor – výkon skrze $L -45^\circ$ polarizátor

S_3 je výkon skrze RC polarizátor – výkon skrze LC polarizátor

Parametry S_1 , S_2 a S_3 mohou reprezentovat xyz -souřadnice systému. Výkon obsažený v polarizované části záření je dán vztahem: [3]

$$P_{polarizované} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} \quad (2.2)$$

Normované Stokesovy parametry lze vypočítat dělením jednotlivých parametrů celkovým výkonem: [3]

$$s_1 = \frac{S_1}{S_0} \quad s_2 = \frac{S_2}{S_0} \quad s_3 = \frac{S_3}{S_0} \quad (2.3)$$

Rozsah normalizovaných Stokesových parametrů je od -1 do 1. Plně polarizované, horizontální, lineární záření je popsáno: $s_1 = 1$; $s_2 = s_3 = 0$

2.2.1 Stupeň polarizace

Stupeň polarizace bývá v literatuře označován jako DOP (z angl. Degree of Polarization). Jedná se o poměr záření polarizovaného vůči záření nepolarizovanému a to dle vztahu [3]:

$$DOP = \frac{P_{polarizované}}{P_{polarizované} + P_{nepolarizované}} \quad (2.4)$$

Stupeň polarizace lze vyjádřit také pomocí Stokesových parametrů:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (2.5)$$

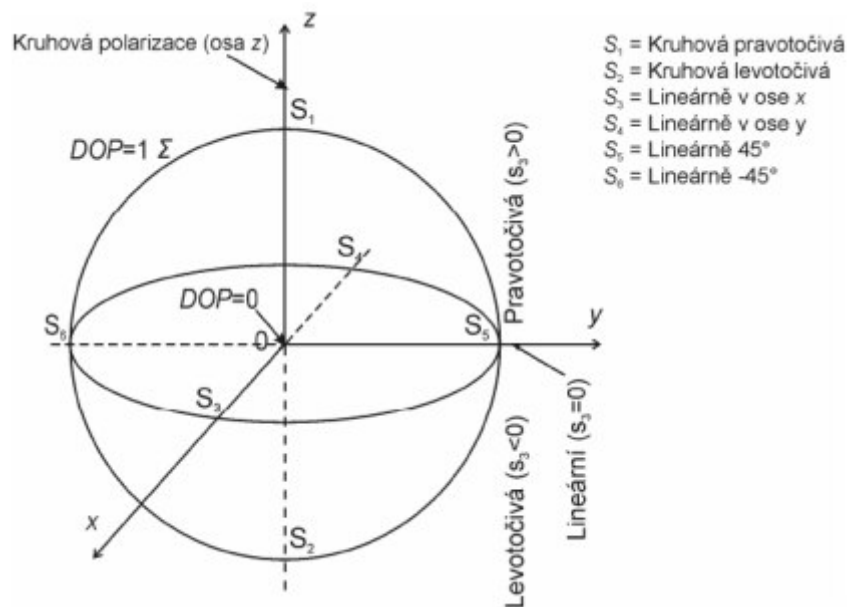
Nebo pomocí normovaných Stokesových parametrů:

$$DOP = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \quad (2.6)$$

Stupeň polarizace nabývá hodnot od 0 do 1, proto jej lze vyjádřit také v procentech. Zcela polarizované záření má tedy hodnotu $DOP = 1$ [-], procentuálně je tato hodnota $DOP = 100\%$. Naopak $DOP = 0$ ($DOP = 0\%$) je vlna zcela nepolarizovaná.

2.3 Poincarého sféra

Poincarého sféra je grafickou pomůckou v reálném 3D prostředí, která umožňuje snadný popis stavu polarizace signálu, jako je stupeň polarizace i její charakter. Definujeme-li si bod v Poincarého sféře pomocí Stokesových parametrů, určení stupně polarizace a charakteru je snadné. Jestliže bod $S = [s_1, s_2, s_3]$ leží na plášti Poincarého sféry, jedná se o zcela polarizované záření. Částečně polarizované záření, které lze považovat za superpozici záření polarizovaného a nepolarizovaného, je reprezentováno bodem uvnitř Poincarého sféry. Vzdálenost od středu pak určuje stupeň polarizace, poloha vůči osám pak stav polarizace. Při $s_3 = 0$ leží bod S na ose xy a vlna je lineárně polarizovaná. Leží-li bod S na ose z , jedná se o kruhově polarizovanou vlnu. Horní část polokoule značí pravotočivou polarizaci, dolní polokoule naopak levotočivou polarizaci. Poincarého sféra s některými možnými stavy polarizace je zobrazena na obrázku 2-2.

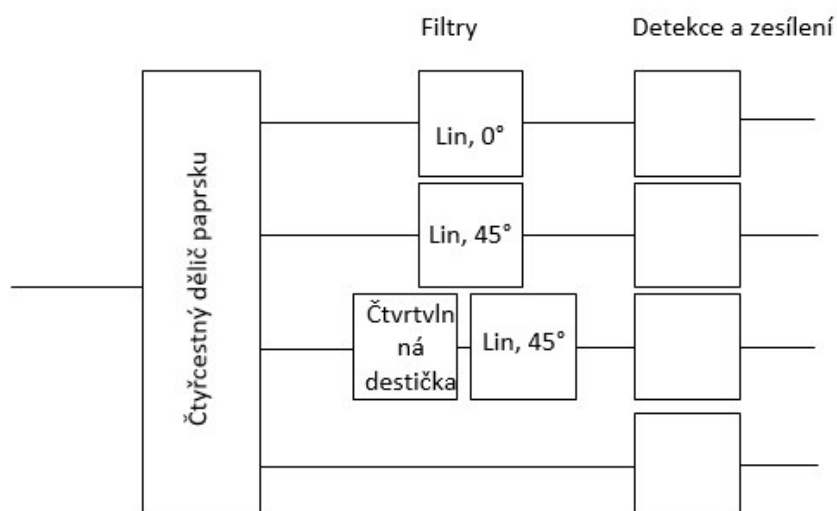


Obrázek 2-2 Poincarého sféra s vyznačenými některými možnými stavy polarizace, převzato z [4]

2.4 Měření polarizace optického záření

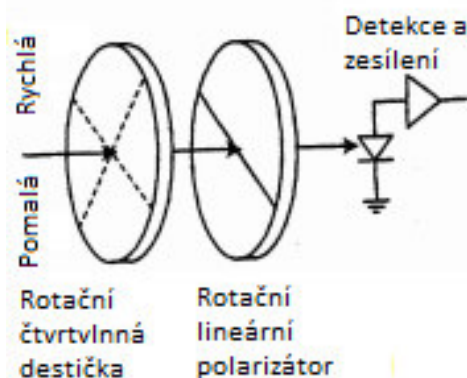
Stav polarizace optického záření lze určit měřením výkonu optického signálu, který prochází polarizačními filtry. Měření vyžaduje rozdělení optické vlny na časové nebo na prostorové vzorky.

Na obrázku 2-3 je zobrazen polarimetr využívající prostorové dělení. Paprsek je rozdělen na čtyři části. Všechny čtyři části jsou dále vedeny paralelně. Jedna část prochází přímo k detektoru bez vložených polarizačních filtrů. Tento paprsek zajišťuje měření celkového výkonu optického záření. Další paprsek je veden přes lineární, horizontální polarizátor a poskytuje hodnoty pro měření parametru S_1 . Třetí paprsek prochází skrz lineární polarizátor s natočením $+45^\circ$ a data jsou k určení parametru S_2 . Poslední paprsek je veden přes čtvrtvlnnou destičku a lineární polarizátor $+45^\circ$. Kruhově polarizované vstupní záření je transformováno na lineární (45°) vlnovou destičkou a po průchodu polarizátorem je měřeno.



Obrázek 2-3 Polarimetr využívající prostorové dělení paprsku

Polarimetr využívající časového dělení záření je zobrazen na obrázku 2-4. Signál prochází skrze čtvrtvlnnou destičku a lineární polarizátor. Destička i polarizátor jsou rotující a rotují nezávisle na sobě. Vlnová destička transformuje vstupní polarizaci. Pouze část světla, která je rovnoběžná s osou převodu, je přenesena přes lineární filtr.



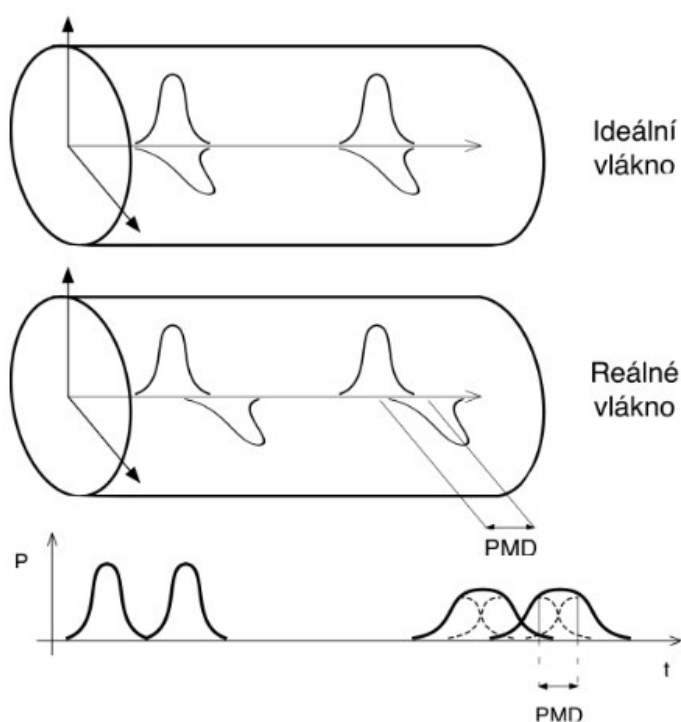
Obrázek 2-4 Polarimetr využívající časového dělení paprsku, převzato z [3]

Polarizace vstupního záření je rotující čtvrtvlnnou destičkou změněna. Změna je závislá na úhlu destičky. Jestliže je vstupní světlo lineárně polarizováno, destička je srovnána s rychlou osou světla, vstupní záření projde beze změny. Pootočí-li se destička o 45° , záření je rotováno doprava. Dalším pootočením o 45° je dosaženo opět lineární polarizace, ale destička je srovnána s pomalou osou světla. Otočí-li se destička znovu o 45° , tedy na 135° , záření rotuje doleva. 180° otočení je opět původní polarizace záření. [4]

Lineární polarizátor mění polarizační modulaci na modulaci amplitudovou. Paprsek je pak veden k detektoru, který dodává proud úměrný přijatému optickému výkonu a druhé mocnině intenzity elektrického pole. Proud fotodiodou obsahuje tři složky: DC složku, složku s frekvencí dvojnásobnou frekvence otáčení čtvrtvlnné destičky a složku s frekvencí čtyřnásobnou frekvence otáčení destičky s fázovým posuvem. [4]

2.5 Polarizační vidová disperze a její stabilizace

Polarizační vidová disperze (PMD – z angl. Polarization Mode Dispersion) je náhodná, v čase proměnná veličina. Jedná se o druh zkreslení způsobený rozdílnými délkami tras obou polarizačních rovin vidu při průchodu deformovaným optickým vláknem. Deformace vlákna vzniká převážně výrobní nedokonalostí, mechanickým namáháním a nevhodnou montáží vlákna. PMD má velký vliv na rychlost přenášeného signálu a na odstup signál-šum (SNR).



Obrázek 2-5 Znázornění PMD v optickém vlákně, převzato z [5]

Pokud sloučíme složku rychlé osy se složkou pomalé osy šíření světelného signálu, dostáváme vektor elektrického (magnetického) pole. Polarizační vidy na konci optické trasy jsou od sebe zpožděny v čase o $\Delta\tau$, díky čemuž dochází k jejich roztahování. To způsobí omezení maximální přenosové rychlosti trasy a zhoršení SNR. Zpoždění je označováno jako DGD (Differential Group Delay) a je základním měřítkem PMD. DGD je měřeno v pikosekundách. Velikost DGD je závislá jak na čase, tak i na vlnové délce.

Telekomunikační optická vlákna jsou označena tzv. PMD koeficientem, který vyjadřuje míru neurčitosti. V současnosti vyráběná optická vlákna mívají hodnotu PMD garantovanu na hodnotu $0,5ps/\sqrt{km}$.

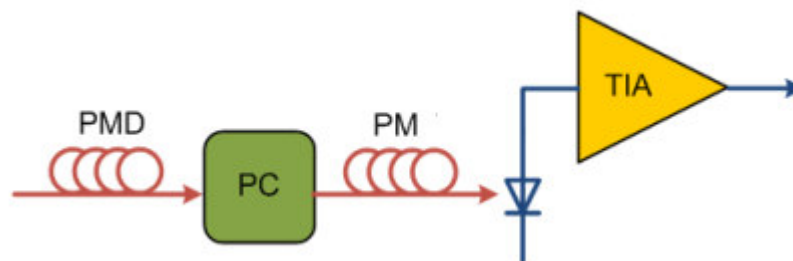
Přenosové vlastnosti optického vlákna lze částečně stabilizovat kompenzací PMD jevu. PMD nelze zcela anulovat, jelikož má náhodný charakter. Existují techniky kompenzace, které dokážou realizovat určitou korekci PMD efektu:

- Optická PMD kompenzace
- Optoelektronická PMD kompenzace
- Elektrická PMD kompenzace

2.5.1 Optická kompenzace polarizační vidové disperze

Optická kompenzace je založena na využití optického vlákna, které je polarizací zachovávající, tzv. PM vlákno (polarization maintaining). Ke kompenzaci je také využit PC kontrolér, který vyrovnává polarizační stav světelného signálu s PSP (principal states of polarization) stavem v PM vlákne. PM vlákno je využito ke generování přesné velikosti DGD zpoždění. Této vlastnosti je docíleno výrobou vlákna s velkým, ale kontrolovaným dvojlomem.

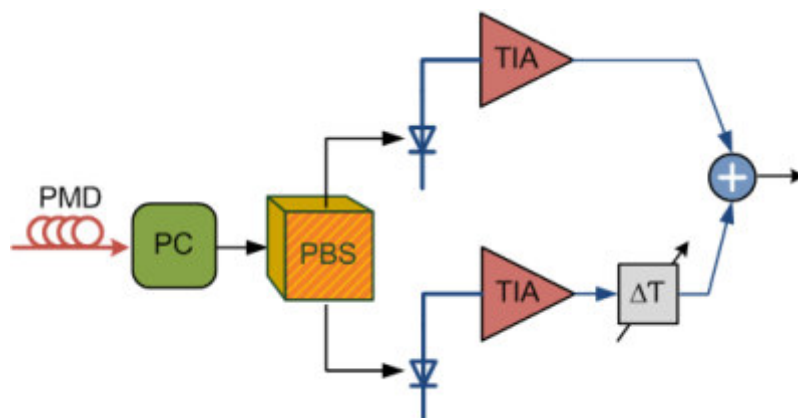
Optická kompenzace má však i několik nevýhod. Mezi ně patří fakt, že optické prvky pro tento způsob kompenzace jsou drahé a relativně objemné. Další nevýhodou je nárok na rychlost a přizpůsobivost kompenzátoru [6].



Obrázek 2-6 Principiální schéma optického PMD kompenzátoru, převzato[6]

2.5.2 Optoelektronická kompenzace polarizační vidové disperze

Při optoelektronické kompenzaci PMD je signál přiveden na polarizační kontrolér PC a následně rozdělen do dvou větví. Světelné signály jsou převedeny na elektrické signály pomocí dvou separátních transimpedančních zesilovačů. Elektrický signál, který odpovídá světlu v rychlé ose je zpožděn interním porovnávačem DGD zpoždění. Poté jsou oba signály znovu sloučeny, avšak s minimalizací PMD efektu. Princip je znázorněn na obrázku 2-7 [6].

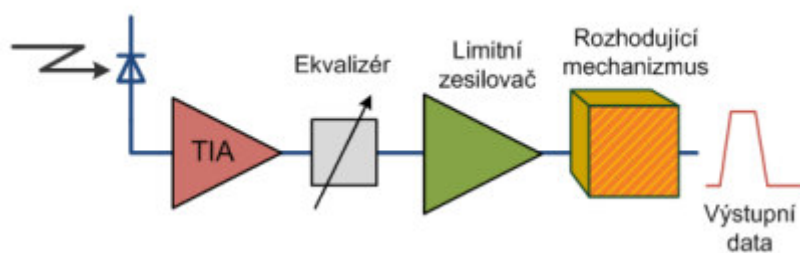


Obrázek 2-7 Optoelektronický PMD kompenzátor, převzato z [6]

2.5.3 Elektronická kompenzace polarizační vidové disperze

Elektronická PMD kompenzace využívá ekvalizace elektrického signálu, který je výstupem fotodiody a transimpedančního zesilovače. Blokové schéma elektronické kompenzace PMD je zobrazeno na obrázku 2-8.

Elektrický ekvalizér nabízí vysoký stupeň integrace. Při srovnání s optickým a optoelektronickým kompenzátozem má elektrický kompenzátor nižší cenu, proto je tato varianta velmi oblíbená a užívaná[6].



Obrázek 2-8 Elektronický PMD kompenzátor, převzato z [6]

3 MĚŘICÍ ŘETĚZCE

Většina optických materiálů vykazuje určitý stupeň anizotropie, což umožňuje světlu ve dvou ortogonálních stavech polarizace procházet materiálem rozdílnou rychlostí. Tento jev je znám jako dvojlom. Stav polarizace, do kterého se dostane dopadající světlo, je po průchodu daným prostředím dán vlastnostmi materiálu. Materiály s vhodně definovanou strukturou, jako například krystal křemíku, při průchodu vlny stav její polarizace zachovávají. Polarizace vlny po průchodu dvojlomným prostředím může být lineární nebo kruhová. Nejčastěji je však využívána lineární dvojlomnost. Krystaly jsou vždy lineárně dvojlomné.

K sestavení měřicího řetězce je nutné dodržet zásadní podmínku. Všechny prvky řetězce musí být, v ideálním případě, polarizaci zachovávající.

3.1 Zdroj polarizovaného laserového záření

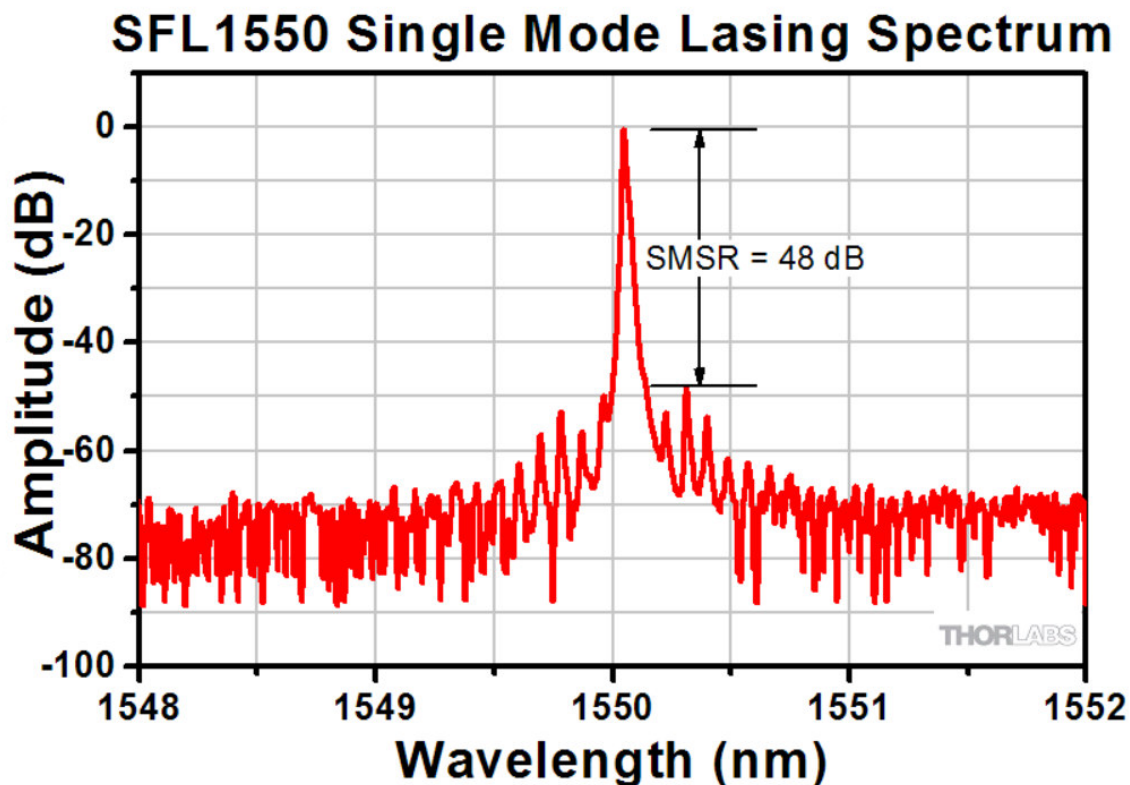
Pro účely měření byla použita jako zdroj laserového záření laserová dioda. Důvodem použití laserové diody je fakt, že generované záření je již do určité míry polarizované. Záření z diody je zavedeno do vlákna (tzv. pigtailu), které je zakončeno FC/APC konektorem.

Vhodným zdrojem záření pro účely této práce je například laserová dioda dodávaná společností Thorlabs, konkrétně model SFL1550P. Vlnová délka generovaného záření je $1550\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$. Tento zdroj je proudově, výkonově a teplotně stabilizován speciálním řídicím obvodem. Stabilizace je nutná k zajištění výstupního záření s konstantní výkonovou úrovní a stabilní vlnovou délkou.



Obrázek 3-1 Laserová dioda SFL1550P

V technické specifikaci laserové diody na stránkách výrobce lze nalézt kromě důležitých provozních parametrů také předpokládanou spektrální charakteristiku záření této diody (Obrázek 3-2). V této spektrální charakteristice je zakreslen údaj SMSR, který značí odstup hlavního peaku užitečného signálu od nejbližšího vedlejšího peaku.

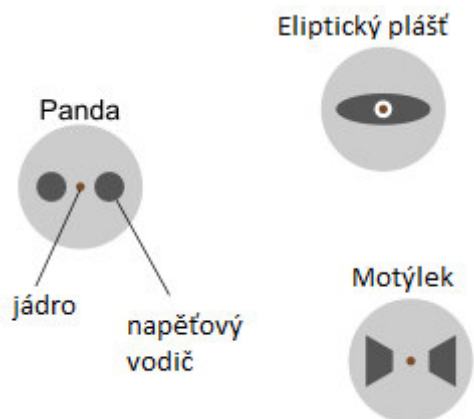


Obrázek 3-2 Spektrální charakteristika laserové diody udávaná výrobcem, převzato z [10]

3.2 Polarizaci zachovávající optická vlákna (PM fiber)

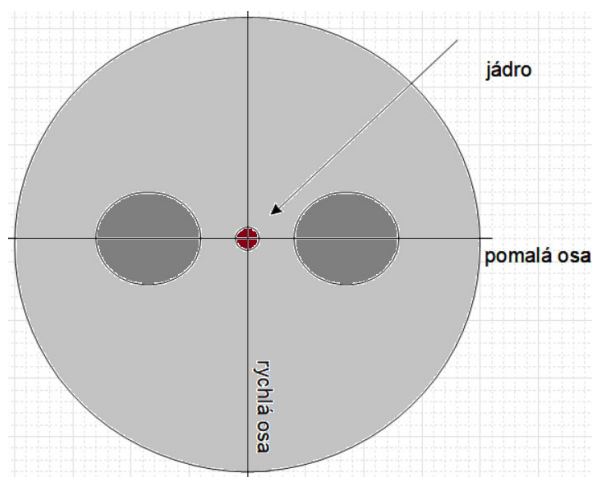
Polarizaci zachovávající optická vlákna (PM – polarization-maintaining) spadají do třídy vysoce lineárně dvojlomných jednomodových (SM - singlemode) vláken. PM vlákna se běžně užívají k přenosu lineárně polarizovaného záření mezi dvěma body, nejčastěji ve vysokorychlostních telekomunikačních systémech. PM vlákna jsou také využívána v senzorech k měření vibrací, napětí, dvojlomnosti, teploty, ohnutí, délky, atd. [7]

Dvojlomu může být docíleno vložení jádra vlákna mezi, nebo dovnitř skleněných prvků různého fyzického složení. Dvojlom může být způsoben také účelovou asymetrií geometrie jádra (formovaný dvojlom). V každém případě je výsledkem rozdílný index lomu mezi ortogonálními osami eliptického pohybu vektoru polarizace procházející vlny. Některé typy PM vláken jsou zobrazeny na Obrázku 3-3.



Obrázek 3-3 Příklady PM optických vláken

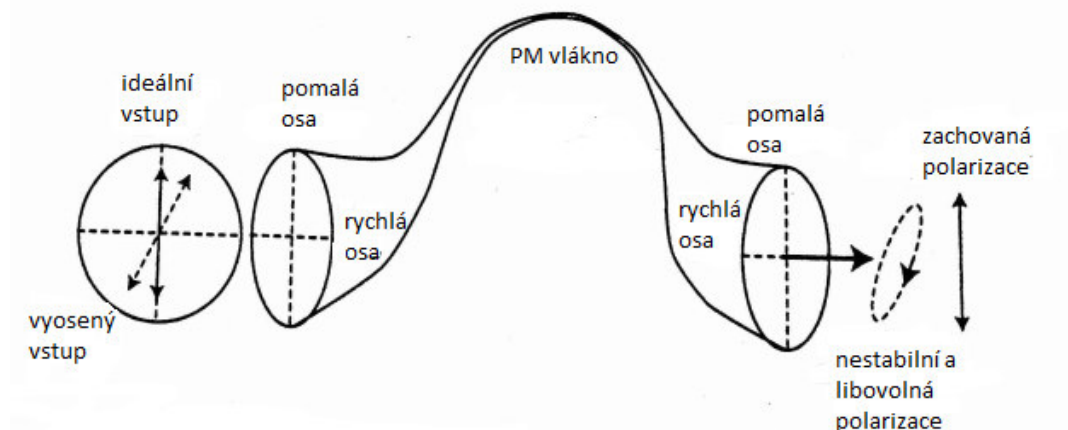
Dvojlom u PM vláken je mnohem větší a rovnoměrnější než u obyčejných SM vláken. Protože dvojlom souvisí se systematickou fyzickou asymetrií průřezu vlákna, PM vlákna udržují stav polarizovaného záření srovnaný se svými dvěma pravoúhlými osami – rychlou a pomalou (Obrázek 3-4). Záření vstupující do PM vlákna je rozděleno na dva ortogonální, lineární módy nebo vlny podle toho, jak je promítnuto vstupní elektrické pole na rychlou a pomalou osu světla. Ve většině aplikací je vektor souhlasný s dominantním směrem charakterizujícím polarizaci polarizované vlny rovnoběžný s jednou z os, nejčastěji s pomalou osou světla.



Obrázek 3-4 PM vlákno typu panda - zobrazení rychlé a pomalé osy

Pouze pokud je elektrické pole světla zcela rovnoběžné s rychlou nebo pomalou osou světla, je PM vlákno zcela polarizaci zachovávající. Z důvodu rozdílného indexu lomu ve směru kolmém na rychlou a pomalou osu světla jsou elektrická pole vzájemně fázově posunuta, úměrně dráze světla ve směru jeho pohybu vláknem. Na obrázku 3-5 je zobrazen princip zachování polarizace procházející vlny záření. Pokud do vlákna vstupuje vlna lineárně polarizovaného záření (ve stejném úhlu jako je pomalá nebo rychlá osa vlákna – ideální vstup), pak je polarizace zachována i po průchodu PM vláknem.

Jestliže je však vstupující polarizované záření výrazně odchýleno od úhlů os (vyosený vstup), nelze na výstupu PM vlákna zaručit zachování polarizace vystupující vlny záření.



Obrázek 3-5 PM vlákno - zobrazení při správném a vyoseném vstupu

Použité PM patchcody byly všechny typu PANDA. Pro zajištění kompatibility typů konektorů bylo třeba použít jednak patchcody s oběma konektory typu FC/APC, ale také patchcody FC/APC – FC/PC. Tyto hybridní patchcody byly sestaveny ze dvou patchcordů: FC/APC – SC/APC a SC/APC – FC/PC, které byly propojeny SC spojkou.

Využití konektory pro optická vlákna

Spojení optických vláken může být provedeno jako nerozebíratelné nebo rozebíratelné. Nerozebíratelné spojení vláken je prováděno svařením očištěných konců vláken k sobě. Pro rozebíratelné spojení vláken je nutné konec vlákna opatřit konektorem. V praxi je využíváno mnoho typů konektorů. Pro účely experimentu v této práci postačí seznámení s těmito typy konektorů: FC, SC, LC

FC (označení podle angl.: Ferrule Conector nebo také Fiber Channel) je typ šroubovacího konektoru se standardizovaným závitem M8x0.75 a ferulí o průměru 2,5 mm.



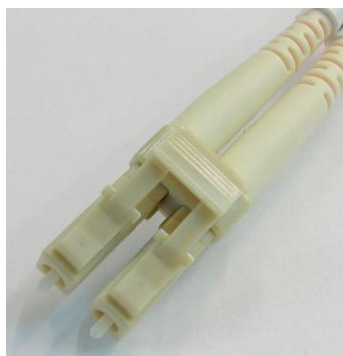
Obrázek 3-6 Konektor typu FC

SC (z angl.: Subscriber Connector, nebo Square Connector nebo Standard Connector) je zásuvný konektor se čtvercovým tvarem, typu push&pull (zatlačit&vytáhnout). Průměr ferule je stejně jako u PC konektoru 2,5 mm.



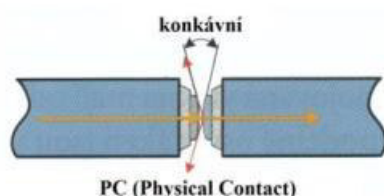
Obrázek 3-7 Konektor typu SC

LC (z angl.: Lucen Connector nebo Local Connector nebo Little Connector) je opět zásuvný konektor, ale oproti SC konektorům má poloviční průměr ferule, tedy 1,25 mm. Využívá se hlavně pro velkokapacitní propojení a ve vysílačích a přijímačích pro SFP a SFP+.



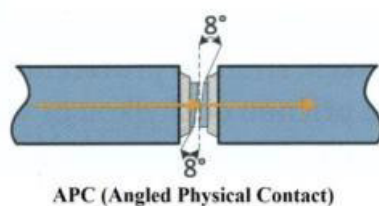
Obrázek 3-8 Konektor typu LC

Další označení konektorů je v názvu za lomítkem. Může být buď varianta PC nebo APC. Rozdíl je v broušení kontaktních ploch. PC konektory mají broušení téměř ploché, z důvodu eliminace zpětných odrazů signálu na spoji je čelo jádra mírně vypouklé (konkávní). Případné odražené signály směřují mimo jádro vlákna.

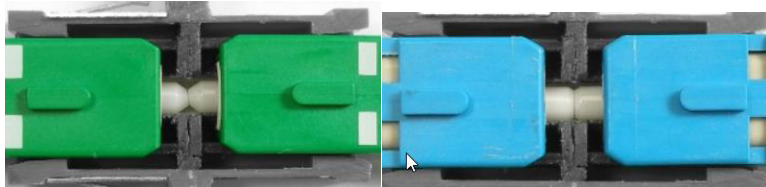


Obrázek 3-9 Broušení ferule PC konektoru, převzato z [9]

APC (Angled PC) mají čelní plochu ferule broušenou pod úhlem 8° (s danou orientací vůči zámku konektoru). Toto opatření je opět proti nežádoucím zpětným odrazům na přechodu. Při zapojení je nutné dbát na správné zapojení, PC konektory spojuvat opět s PC konektory. Při spojení konektoru PC s APC konektorem dojde v lepším případě k útlumu signálu, řádově 10 dB. V horším případě hrozí poškození kontaktních ploch konektoru. Pro jednoduché rozlišení jsou PC konektory vyráběny s modrým plastovým označením a APC mají barvu zelenou [11].



Obrázek 3-10 Broušení ferule APC konektoru, převzato z [9]



Obrázek 3-11 Správné zapojení konektorů, vlevo APC, vpravo PC, převzato z [11]

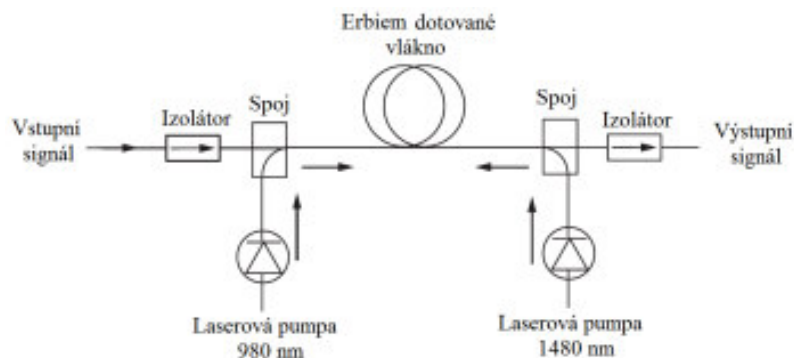


Obrázek 3-12 Detail nesprávného zapojení konektorů PC s APC, převzato z [11]

3.3 Vlákňový zesilovač

V měřicím řetězci je pro zesílení signálu použit EDFA (Erbium dopovaný vláknový zesilovač, z angl.: erbium doped fiber amplifier). Tento zesilovač bývá použit jako předzesilovač na straně přijímače. Má nižší zisk než koncový výkonový zesilovač na vysílací straně.

Nevýhodou vláknového zesilovače je fakt, že zesiluje nejen užitečný signál, ale také šum. Pozitivní vlastnosti vláknového zesilovače lze využít v kombinaci s optickým filtrem.



Obrázek 3-13 - EDFA zesilovač, převzato z [9]

Pro většinu aplikací EDFA zesilovače není nutné zachovávat polarizaci vstupního záření. Experimentální měření bylo tedy provedeno s EDFA zesilovačem, který byl dostupný a který polarizaci procházející vlny nezachovával. Jedná se o EDFA vyrobený firmou KEOPSYS, konkrétně model KPS-CUS-BT-C-10. Právě tento model bohužel není polarizaci zachovávajícím zesilovačem. Na trhu jsou však dostupné i EDFA zesilovače, které jsou polarizaci zachovávající. Jedním takovým je například EDFA100P, vyráběný firmou Thorlabs. Pořizovací náklady jsou však řádově o 1000 € vyšší než „obyčejného“ EDFA zesilovače [12].

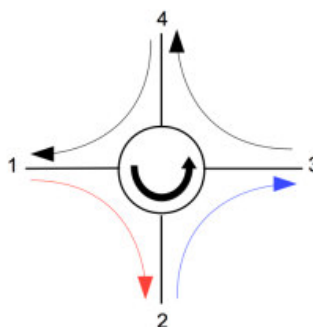


Obrázek 3-14 Použitý EDFA zesilovač

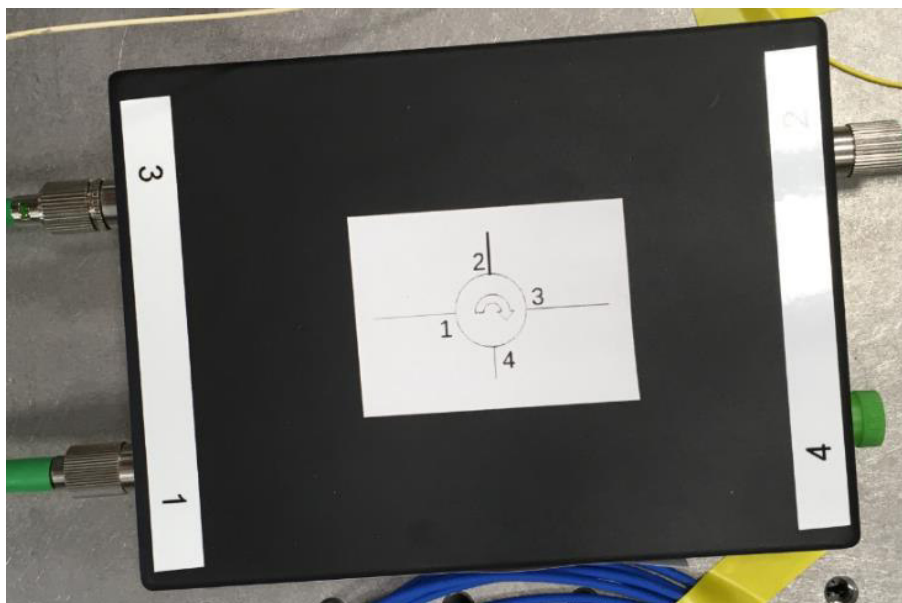
3.4 Optický filtr

Pro zajištění měření na stejné vlnové délce, a tedy oddělení šumu, který má odlišnou vlnovou délku, byl v měřicím řetězci použit optický filtr. Tento filtr je typu pásmová propust s vlnovou délkou shodnou se zářením vystupujícím z laseru. Filtr byl sestaven ze dvou komponentů: optického cirkulátoru a vláknového filtru s Braggovou mřížkou.

K minimalizaci odražené vlny byl jako první komponent využit optický cirkulátor, jehož principiální schéma je znázorněno na obrázku 3-15. Optický cirkulátor přenáší signál pouze mezi jednotlivými porty. Signál vstupující do portu 1 je přenesen (s nízkým útlumem) do portu 2, signál z portu 2 pak na port 3 atd. Odražená vlna je tedy přenesena na následující port, nikdy ne zpět ke zdroji záření. V měření je zesílený signál zdroje polarizovaného záření připojen na port č. 1 optického cirkulátoru.

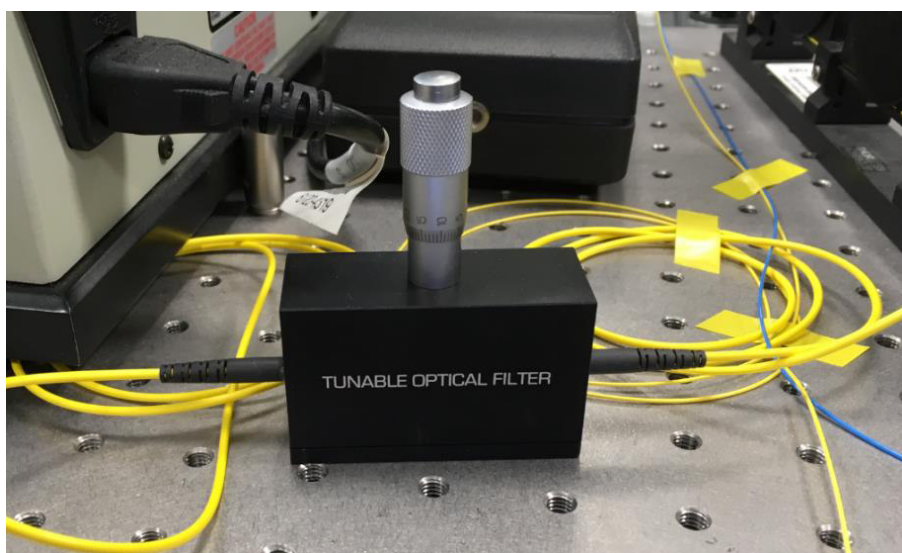


Obrázek 3-15 Princip cirkulátoru



Obrázek 3-16 Použitý optický cirkulátor

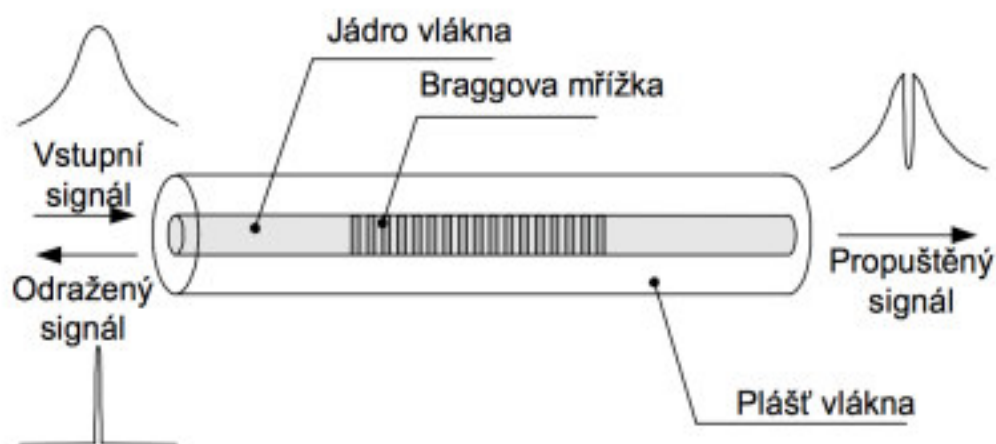
Dalším prvkem je samotný optický filtr. Ten byl připojen na port 2 optického cirkulátoru. Jednou z možností volby optického filtru je použití filtru, využívajícího principu Braggovy mřížky.



Obrázek 3-17 Laditelný optický filtr

3.4.1 Braggova mřížka

Principem Braggovy vláknové mřížky je periodická změna indexu lomu v jádře optického vlákna. V přímém směru zapojení funguje jako pásmová zadrž. Jestliže se tento filtr zapojí jako jedno-portové zařízení, pak se jedná o pásmovou propust, která využívá odrazu části spektra vstupního záření. Princip je znázorněn na obrázku (3-15).

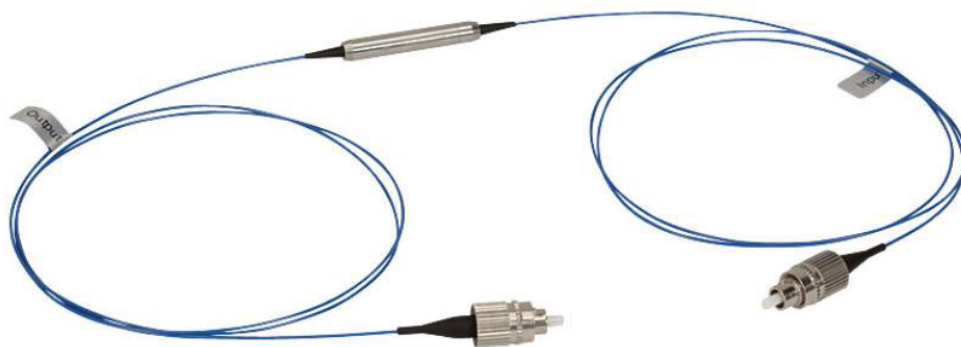


Obrázek 3-18 Princip Braggovy vláknové mřížky, převzato z [9]

3.5 Lineární vláknový polarizátor a vláknový dělič svazku

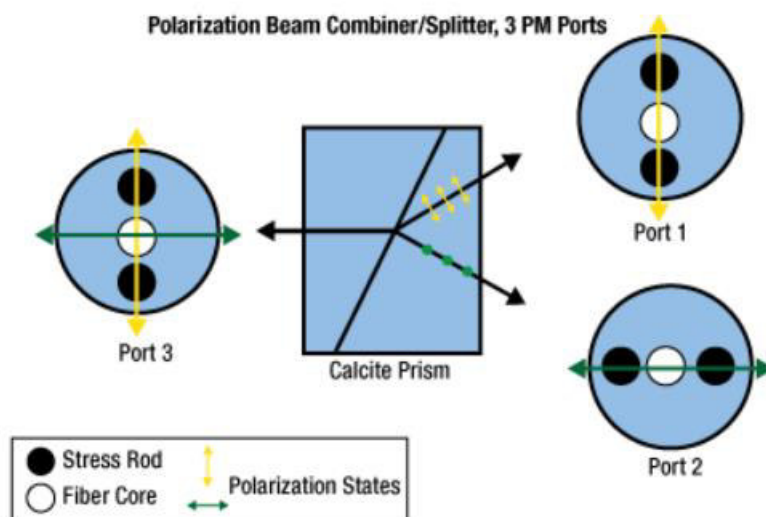
Lineární vláknový polarizátor je navržen tak, aby lineárně polarizovanou optickou vlnu daného směru polarizace propustil a záření jiného směru polarizace blokoval. Dokáže utlumit nepolarizované záření s vysokou hodnotou extinkce (zeslabení záření při průchodu prostředím, je způsobena rozptylem a absorpcí světla a je závislá na vlnové délce záření[13]) – až 23 dB. Lineární vláknový polarizátor lze také použít ke zvýšení poměru extinkce polarizovaného záření. PM verze polarizátoru srovnává záření s pomalou osou vlákna [14].

Pro měření byl použit lineární polarizátor od výrobce Thorlabs, model ILP1550PM – FC (obrázek 3-19).



Obrázek 3-19 Lineární vláknový polarizátor

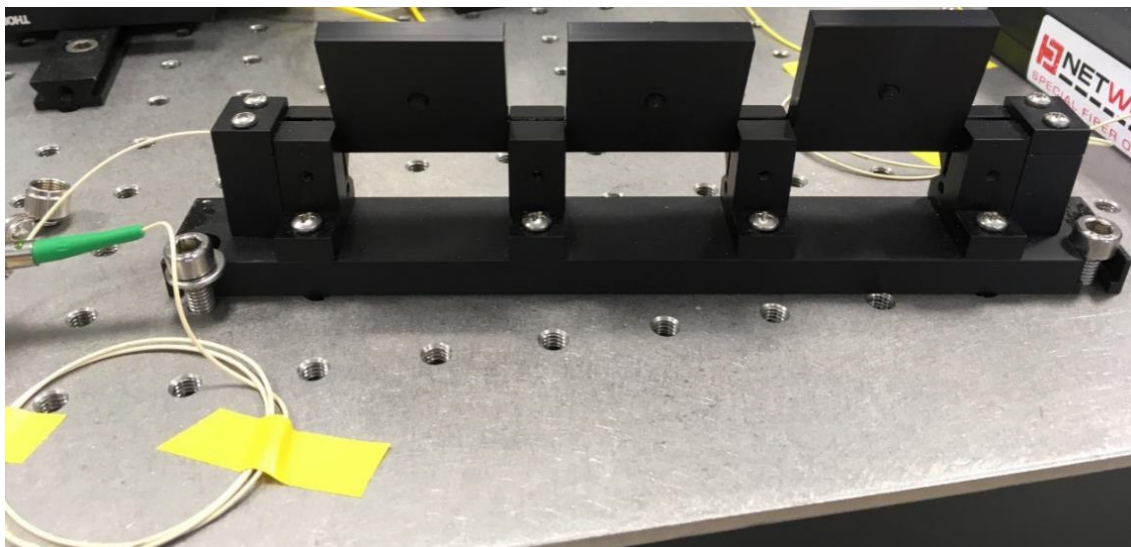
Vláknový dělič svazku může být zapojen jako dělič svazku, kdy je jeden vstupní signál rozdělen do dvou navzájem ortogonálních lineárně polarizovaných signálů, nebo jako slučovač, při zapojení opačném. Pro náš experiment je využito zapojení jako dělič. Dělení svazku probíhá přes kalcitový hranol. Směry polarizace polarizovaných signálů jsou po rozdělení srovnány s pomalými osami dílčích PM vláken.



Obrázek 3-20 Princip děliče/slučovače svazku s PM vlákny, převzato z [15]

3.6 Třílopatkový polarizační kontrolér

Princip kontroléru je založen na vzniku dvojlomu vlákna jeho (torzní) deformací. Zařízení je složeno ze tří destiček, ve kterých je na cívkách navinuto optické vlákno. Výrobce je vinutí v lopatkách navrženo tak, aby vznikly přibližně dvě čtvrtvlnné a jedna půlvlnná fázová destička v pořadí: čtvrtvlnná, půlvlnná, čtvrtvlnná. Kombinací natočení destiček lze docílit změny stavu polarizace vstupního záření z kruhového na lineární a naopak. Kontrolér lze užít i pro experimentální dorovnání stavu polarizace na požadovanou hodnotu.



Obrázek 3-21 Třílopatkový polarizační kontrolér

Na obrázku 3-21 je zobrazen polarizační kontrolér, který byl využit v měřicím řetězci. Kontrolérem neprochází PM vlákno, tudíž pro potřeby tohoto experimentálního měření bylo nutné zajistit co možná nejlepší mechanické zajištění vlákna. Mezi hlavní důvody patří fakt, že polarizace vlny procházející obyčejným SM vláknem je velice silně závislá na změnách teploty vlákna a mechanické nestabilitě pracoviště.

3.7 Polarimetr

K experimentálnímu účelu této práce byl využit polarimetr od firmy Thorlabs, model PAX 5700. Tento polarimetr je schopen měřit polarizovaný stav jak světelné vlny šířící se volným prostorem, tak i vlny navázané v optickém vlákně. Polarimetr má vysokou hodnotu dynamického rozsahu 70 dB a vzorkování 333 vzorků za sekundu. K polarimetru se externě připojují detektory pro rozsah měření vlnových délek od 400 do 1700 nm. Normované Stokesovy parametry s_1 , s_2 a s_3 je možné určit s přesností menší než 0,005 a následně, pomocí dodávaného software, zobrazit jednotlivé hodnoty polarizovaného stavu na povrchu Poincarého sféry s přesností $\pm 0,2^\circ$ [8].

Polarimetr je pomocí USB kabelu propojen s počítačem, na kterém je instalován obslužný software. Díky tomuto propojení lze zobrazit stav polarizace, přijímaný výkon, Stokesovy parametry a mnoho dalších sledovaných parametrů v reálném čase. To je vhodné zejména k okamžitému posouzení teplotní nebo mechanické nestability prvků v zapojení měřené soustavy.



Obrázek 3-22 Polarimetr od firmy Thorlabs [8]

Obrázek 3-20 zobrazuje využitý polarimetr i s připojenou sondou (PAN5710IR3). Pro měření polarizace světla vycházejícího z optického vlákna je třeba tuto sondu přizpůsobit (rozšířením o adaptér s FC konektorem, případně adaptér s kolimátorem).

3.8 Optický spektrální analyzátor

K vyhodnocení spektrálních vlastností a určení SNR v jednotlivých bodech měření byl použit IR spektrometr Newport MIR8025, využívající rychlou Fourierovu transformaci. Pracovní rozsah spektrometru je $\Delta\lambda = 700 - 1700 \text{ nm}$. Změřené výsledky jsou vyhodnocovány v PC, kde je instalován obslužný software. Tento software je jednoduše ovladatelný skript naprogramovaný v Matlabu, proto lze data exportovat jako soubor s příponou .mat (čitelný pouze v Matlabu). Pro následné vyhodnocení je tato skutečnost přínosná, protože při práci s výsledky nedochází k zaokrouhlení, což má vliv na přesnost.



Obrázek 3-23 Optický spektrální analyzátor Newport MIR8025

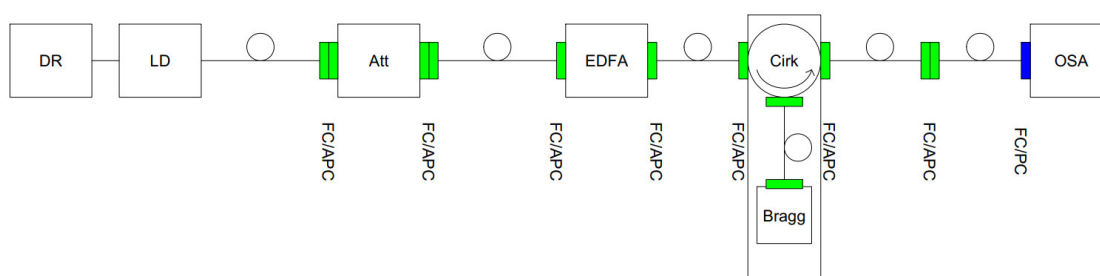
Využitý spektrometr pracuje na principu Michelsonova interferometru s pohyblivým zrcátkem pro aplikaci rychlé Fourierovy transformace. Výstupem měření je spektrum měřeného signálu v relativních jednotkách. Pro přepočet na výkonovou úroveň je třeba užití konverzní tabulky, případně grafu.

3.9 Zapojení měřicích řetězců

Pro tento experiment byly navrženy 3 měřicí řetězce. První byl navržen a sestaven s využitím SM patchcordů, které nezachovávají polarizaci optického signálu. Výsledky měření tohoto řetězce jsou použity jako referenční, pro srovnání rozdílu polarizovaného a nepolarizovaného šíření optického signálu.

Jako zdroj záření je ve všech variantách měřicího řetězce použita laserová dioda (LD). Záření vystupující z laserové diody je již polarizované. Vlnová délka generovaného záření je 1550 nm. K řízení diody je použit řídicí obvod (DR). Z laseru (DR+LD) je záření vedeno do pevného optického atenuátoru (ATT). Atenuátor je použit z důvodu snížení výkonu všech spektrálních složek. Snížením výkonu je zajištěna ochrana polarimetru a optického spektrálního analyzátoru (OSA), který je posledním článkem měřicího řetězce.

Po utlumení výkonu následuje EDFA zesilovač, jehož výstup je připojen ke vstupu optického filtru (OF). Posledním článkem řetězce je optický spektrální analyzátor (OSA).

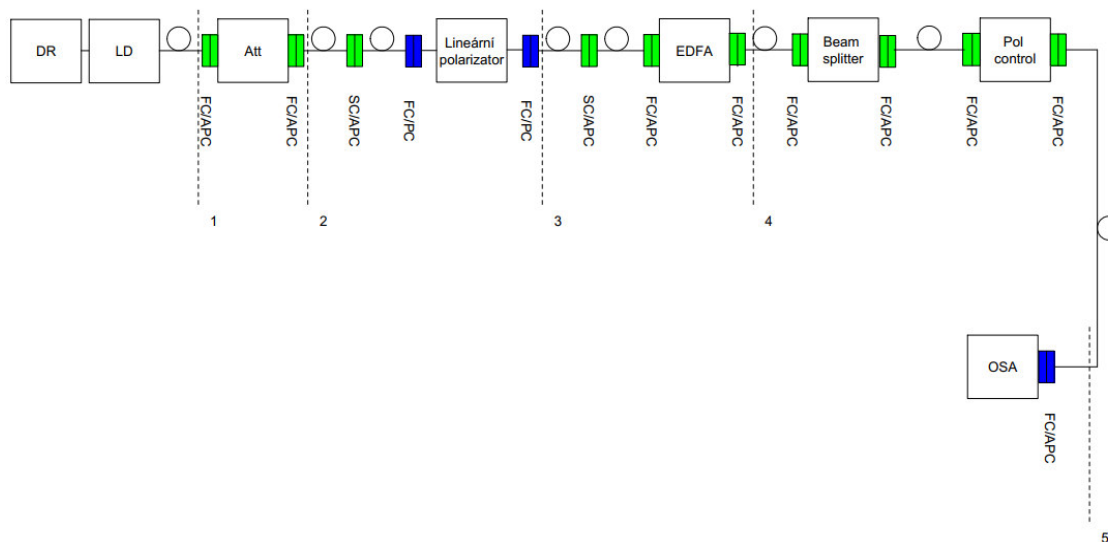


Obrázek 3-24 Referenční měřicí řetězec využívající pouze spektrální filtraci a s polarizací nezachovávajícími vlákny (var. 1)

Referenční měřicí řetězec (Obrázek 3-24) je tedy složen z následujících prvků: řídicí obvod (DR), laserová dioda (LD), pevný atenuátor (Att), vláknový zesilovač (EDFA), cirkulátor (Cirk) s připojeným laditelným optickým filtrem typu Braggova mřížka (Bragg) a na výstupu optický spektrální analyzátor (OSA).

Ve druhém měřicím řetězci (Obrázek 3-25) jsou již použity polarizaci zachovávající optická vlákna. Za laserovou diodou následuje opět pevný atenuátor. Poté je signál veden do lineárního polarizátoru, čímž je po dobu měření zaručena stálá polarizace optického signálu, který je následně veden na vstupní port EDFA zesilovače. Jak již bylo zmíněno, využitý EDFA zesilovač není polarizaci zachovávající, tudíž je nutné zajistit polarizaci signálu v části řetězce za EDFA zesilovačem. Proto je signál z EDFA veden do děliče svazku (beam splitter), kde dochází k rozdělení signálu rychlé a pomalé osy. Za děličem svazku je připojen třílopatkový polarizační kontrolér (Pol control), který dokáže upravit

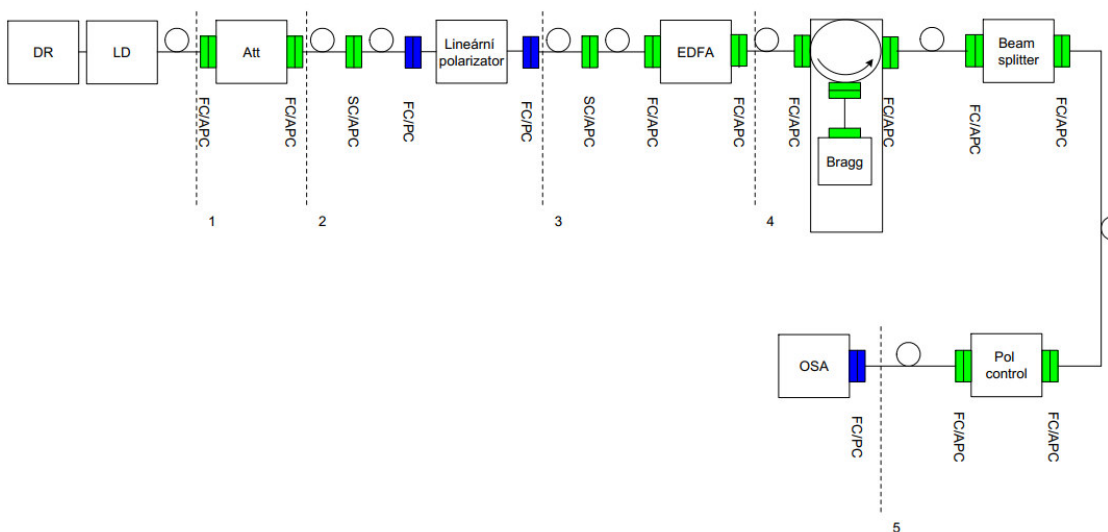
polarizaci na požadované hodnoty. Výstupní signál z kontroléru je po kontrole polarizace polarimetrem veden k vyhodnocení do OSA.



Obrázek 3-25 Měřicí řetězec s PM vlákny využívající pouze polarizační filtraci (var. 2)

Třetí měřicí řetězec vychází z druhého, je pouze doplněn o spektrální filtraci zesíleného signálu po výstupu z EDFA zesilovače. Signál je z EDFA veden do portu 1 optického cirkulátoru, k portu 2 je jednoportově připojen laditelný filtr typu Braggova mřížka a k portu 3 je připojen dělič svazku. Dále je řetězec totožný s předchozím zapojením.

Z důvodu, že EDFA ani OF nejsou polarizaci zachovávající, jsou tyto prvky propojeny SM patchcordem.

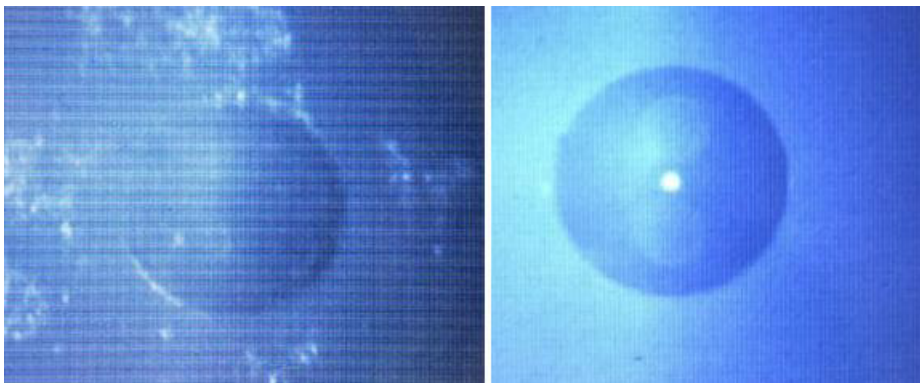


Obrázek 3-26 Měřicí řetězec s PM vlákny využívající jak polarizační, tak spektrální filtraci (var. 3)

Před započetím měření byly pomocí mikroskopu (EXFO – FIP-400 Viewer) zkontrolovány a následně očištěny veškeré konektory patchcordů. Pomocí speciálního čističe Smart cleaner, jehož výrobcem je firma Senko, byly také vyčištěny konektory a spoje v adaptérech (L-bracket), vstupní konektory EDFA zesilovače a další.



Obrázek 3-27 Mikroskop FIP-400 Viewer od výrobce EXFO



Obrázek 3-28 Znečištěný (vlevo) a očištěný (vpravo) konektor PM vlákna typu Panda

4 MĚŘENÍ STAVU POLARIZACE

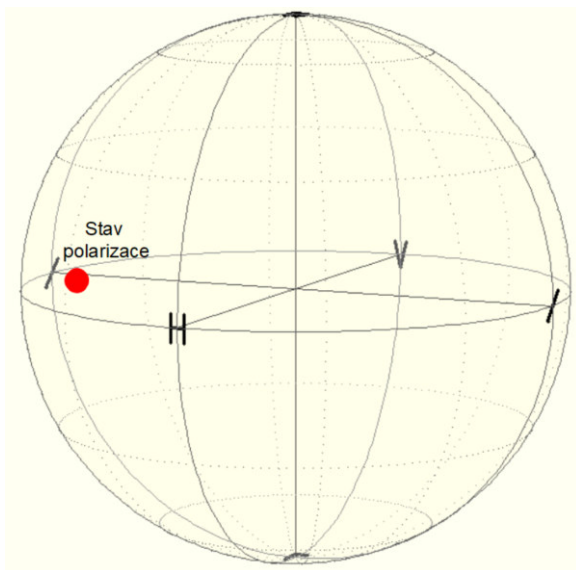
Pomocí polarimetru Thorlabs TXP 5004 byl měřen stav polarizace záření v jednotlivých dílčích částech měřicího řetězce. Body měření jsou v řetězcích označeny přerušovanou čarou a číselným označením 1 – 5.

Cílem této části měření je zobrazit stav polarizace přenášené vlny v předem určených bodech měřicího řetězce. Důvodem je snaha přenášet řetězcem signál beze změny stavu polarizace vlny. Toto měření má odhalit případné změny stavu polarizace procházející vlny.

4.1 Záření vystupující z laserové diody

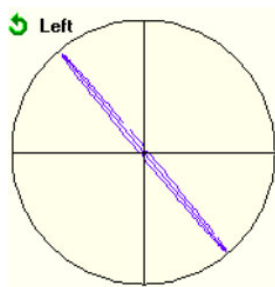
Dle bodu 1 varianty měřicího řetězce 2 a 3 (obr. 3-25 a 3-26) byl změřen stav polarizace záření vystupujícího z vlákna za LD. Budicí proud laserové diody byl nastaven na hodnotu $I_{LD} = 120 \text{ mA}$, chlazení zdroje na hodnotu 25°C . Bylo zjištěno, že záření LD je sice lineárně polarizované, ale směr vektoru definující polarizaci není přesně stanoven ve vertikální nebo horizontální ose (stav polarizace lze zobrazit jako polarizační elipsu – levo nebo pravotočivou). Stupeň polarizace (DOP) záření laserové diody byl roven 99,664 %. Výsledkem měření je rovněž azimut a elipticita polarizovaného záření a přijímaný výkon. Azimut udává úhel mezi vrcholem polarizační elipsy a horizontální osou v daném zobrazení. Elipticita charakterizuje míru změny rovinně polarizovaného světla na elipticky polarizované. Pro lineárně vertikálně polarizovanou vlnu záření je elipticita 0° a azimut 90° . V případě elipticity $\Phi = 45^\circ$ jde o kruhově polarizované světlo.

Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1. Obslužný software polarimetru dokáže v reálném čase zobrazit také normované Stokesovy parametry. Z výstupního grafu Stokesových parametrů lze určit stupeň a směr polarizace sledovaného záření.

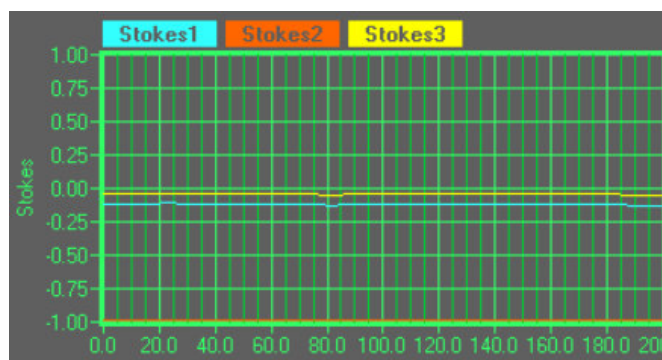


Obrázek 4-1 Zobrazení stavu polarizace záření LD na Poincarého kouli

Na obrázku 4-1 lze vidět Poincarého kouli, na níž je šipkou označen bod, který určuje stav polarizace procházející vlny. V značí polarizaci vlny lineární a směr šíření vlny vertikální, H značí polarizaci vlny lineární a horizontální směr šíření vlny.



Obrázek 4-2 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou – výstup LD



Obrázek 4-3 Grafický výstup polarimetru znázorňující normované Stokesovy parametry

Z průběhu normovaných Stokesových parametrů lze určit, že polarizace světelného záření vystupujícího z laserové diody je v čase měření po dobu 10 minut stabilní.

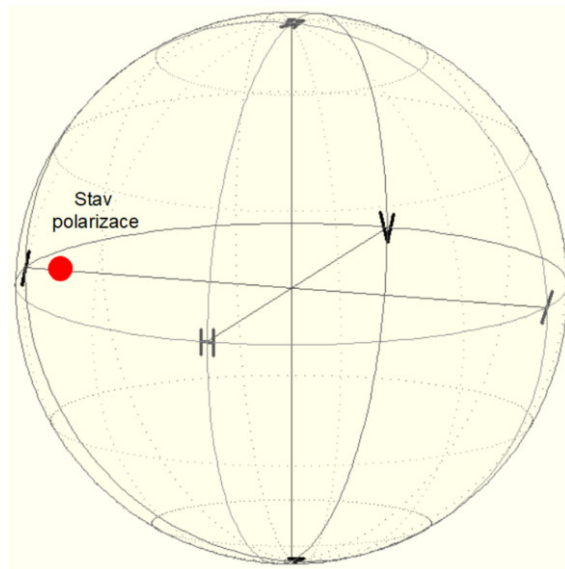
Tabulka 1 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup LD

Budící proud I_{LD}	120 mA
Stupeň polarizace DOP	99,664 %
Azimut	-50,093 °
Eliplicita	-1,677°
Změřený výkon záření LD	5,388 dBm

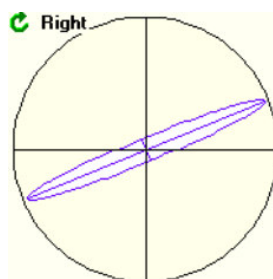
4.2 Záření za pevným atenuátorem

Dalším bodem měření polarizace, pro varianty měřicího řetězce 2 a 3 (obr. 3-25 a 3-26), je výstup z pevného atenuátoru. Bylo zjištěno, že použitý atenuátor nezachovává polarizaci. Z toho důvodu byl v řetězci před EDFA zesilovačem zařazen vertikální polarizátor. Tím byla zajištěna přesná a stabilizovaná polarizace optického záření na vstupu EDFA zesilovače.

Při měření výstupu z pevného atenuátoru byl zvýšen budicí proud laserové diody na hodnotu $I_{LD} = 220$ mA. Pracovní proud laserové diody je dle technické specifikace výrobce určen na hodnotě $I_{OP} = 300$ mA, avšak řídicí obvod kvůli ochraně laserové diody umožňuje nastavit maximální budicí proud $I_{LDmax} = 250$ mA. Další změřené parametry jsou uvedeny v tabulce 2.

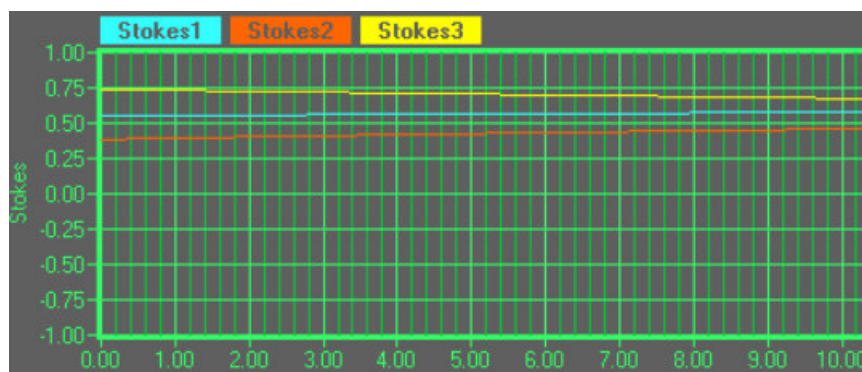


Obrázek 4-4 Zobrazení stavu polarizace záření po průchodu pevným atenuátorem na Poincarého kouli



Obrázek 4-5 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou – výstup ATT

Z obrázku 4-5, který zobrazuje polarizační elipsu záření vlny po průchodu pevným attenuátorem, lze zjistit, že došlo ke změně polarizace z levotočivé na pravotočivou a ke zvýšení stupně elipticity.



Obrázek 4-6 Změřené normované Stokesovy parametry záření za pevným attenuátorem

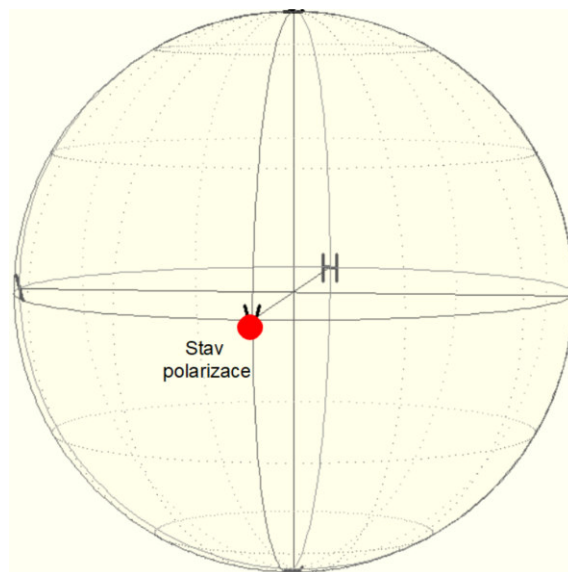
Ze zobrazení normovaných Stokesových parametrů lze určit, že s časem se tyto parametry mění, tudíž tento prvek není polarizačně stabilní. Další problémem může být způsoben rozdílem jádra spojovaného vlákna a attenuátoru. Vláknem, do něž je zavedeno záření z LD, je polarizací zachovávající, typ panda. Konektor pevného attenuátoru je stejný jako u klasického, polarizací nezachovávajícího, singlemodového vlákna.

Tabulka 2 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup ATT

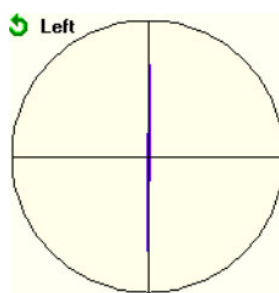
Budící proud I_{LD}	220 mA
Stupeň polarizace DOP	98,596 %
Azimut	22,466 °
Elipticita	5,364°
Změřený výkon záření	3,187 dBm

4.3 Záření za lineárním polarizátorem

Z důvodu nepřesného stanovení směru vektoru definujícího polarizaci záření laserové diody a využití polarizací nezachovávajícího pevného attenuátoru byl do měřicího řetězce zařazen lineární vláknový polarizátor. Výstupní lineárně polarizované záření má přesně stanovený směr šíření vlny (ve vertikální ose). Toto záření je dále vedeno na vstup EDFA zesilovače. Měření stavu polarizace bylo provedeno v místě bodu 3 pro varianty měřicích řetězců 2 a 3 (obr. 3-25 a 3-26).

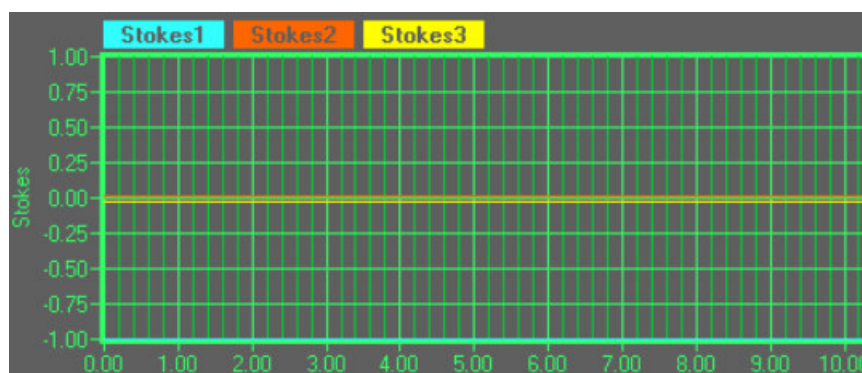


Obrázek 4-7 Zobrazení stavu polarizace záření po průchodu polarizátorem na Poincarého kouli



Obrázek 4-8 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou za lineárním polarizátorem

Po průchodu záření lineárním vláknovým polarizátorem došlo ke změně stavu polarizace s hodnotami blížícími se ideálním hodnotám. Záření je tedy lineárně polarizované se směrem šíření ve vertikální rovině.



Obrázek 4-9 Změřené normované Stokesovy parametry záření za lineárním polarizátorem

Z normovaných Stokesových parametrů (Obrázek 4-9) je viditelná jejich časová stabilita. Lze tedy tvrdit, že použitý vláknový lineární polarizátor je velice přesný a dokáže stabilně potlačit záření jiného směru polarizace.

Tabulka 3 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup lineárního polarizátoru

Budící proud I_{LD}	220 mA
Stupeň polarizace DOP	99,846 %
Azimut	89,768 °
Eliplicita	-0,728°
Změřený výkon záření	-2,215 dBm

V ideálním případě by stupeň polarizace měl být roven hodnotě DOP = 100%, azimut = 90° a eliplicita = 0°. Ze změřených hodnot lze usoudit, že hodnoty jsou velice blízké teoretickým hodnotám.

4.4 Záření procházející EDFA zesilovačem

Použitý EDFA zesilovač Keopsys (KPS-CUS-BT-C-10-LN-SM-011-FA-FA) není polarizaci zachovávající. Přivedeme-li na vstup zesilovače polarizované záření (viz. Zapojení měřicího řetězce č. 1), výstupní signál to ovlivní (z hlediska polarizace výstupního signálu). Pokud je laserová pumpa zapnutá bez vstupního záření, výstupní signál má zcela náhodnou polarizaci. Měření polarimetrem (v bodě č. 4 pro varianty měřicího řetězce 2 a 3; obr. 3-25 a 3-26) je pak zcela nepodstatné, protože pokud výsledný signál není srovnán s jednou nebo druhou osou, obslužný software zobrazí pouze aritmetický průměr hodnot mezi oběma osami. Tento bod je navíc časově nestálý. Zobrazený bod v Poincarého kouli tedy při pozorování nahodile cestuje.

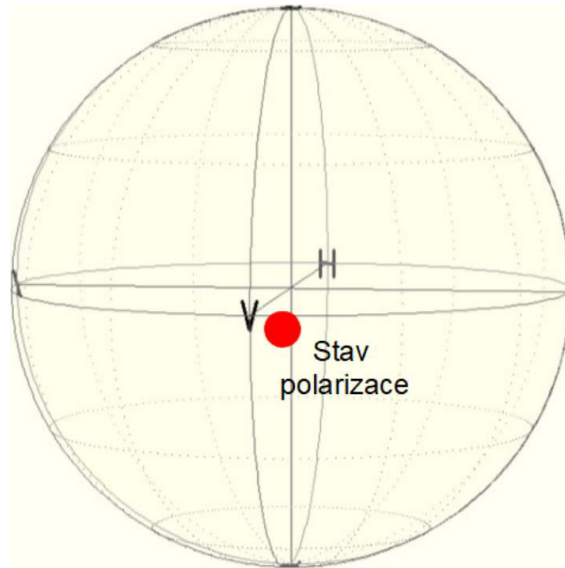
Z důvodu polarizační nestability zesíleného signálu je třeba provést polarizační filtraci za zesilovačem. Dalším důvodem polarizační filtrace je minimalizace nahodile polarizovaného šumu v užitečném signálu, čímž by teoreticky mělo být docíleno i spektrální a výkonové stability signálu.

Na zesilovači byla nastavena hodnota budícího proudu vnitřního zdroje LD zesilovače na $I_{LD\ edfa} = 106$ mA. Tato hodnota byla shledána jako dostačující pro potřeby měření a pro všechna zapojení se neměnila. Bez připojeného vstupního signálu byl odečten z displeje zesilovače výstupní výkon $P_{OUT} = 3,3$ dBm. Po připojení vstupního polarizovaného záření, které bylo zesíleno, se výstupní výkon zvýšil na hodnotu $P_{OUT} = 8,5$ dBm.

4.5 Výstupní záření dle druhého měřicího řetězce

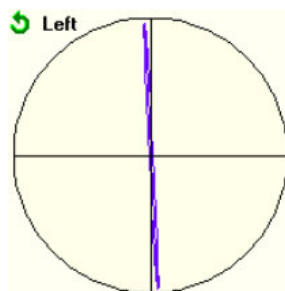
Zesílený signál použitým EDFA zesilovačem je v tomto zapojení měřicího řetězce filtrován pouze polarizačně (spektrální filtrace v zapojení měřicího řetězce č. 2 prováděna není). Protože k experimentu nebyl dostupný druhý vláknový lineární polarizátor, byl jako filtr použit vláknový dělič svazku, který vstupní signál rozdělí na dva výstupní signály, které jsou srovnány v jednom výstupu s pomalou osou vlákna, v druhém výstupu s rychlou osou vlákna. Jelikož vstupní signál má náhodnou polarizaci, nelze podle výstupního výkonu přesně určit, ve kterém vlákně je záření srovnáno s pomalou osou vlákna a ve kterém s rychlou osou vlákna.

Pro účel polarizační filtrace však dělič svazku postačí. Za děličem je zapojen třílopatkový polarizační kontrolér, pomocí něhož je rovina polarizace procházející vlny stáčena a upravována do požadovaného směru. Měření stavu polarizace výstupního záření bylo provedeno dle bodu 5 varianty měřicího řetězce č. 2 (obr. 3-25).



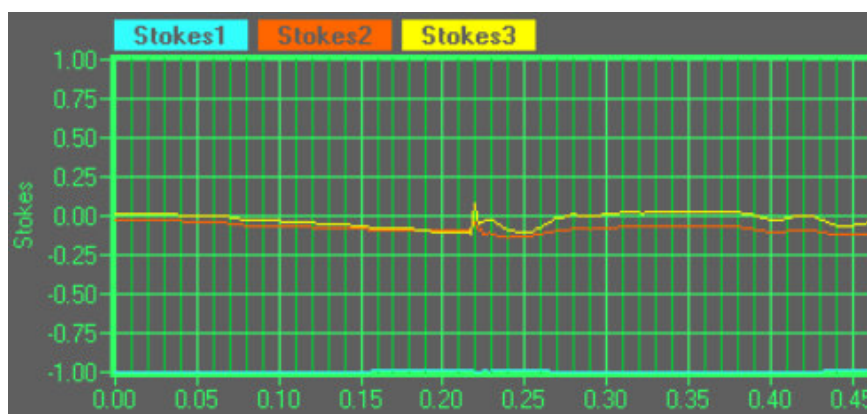
Obrázek 4-10 Zobrazení stavu polarizace záření na výstupu měřicího řetězce zapojeného podle varianty č. 2 (polarizační filtrace) na Poincarého kouli

Parametry polarizace výstupního záření byly sledovány v delší časové linii. Měření probíhalo po dobu 30 minut bez přítomnosti osob v uzavřené laboratoři. Změřené normované Stokesovy parametry jsou zobrazeny na Obrázku 4-12. Z tohoto výstupu je zřejmé, že polarizace na výstupu daného řetězce není stabilní v časové ose. Pro stabilizaci by dorovnávání stavu polarizace muselo probíhat automaticky a v krátkých časových intervalech.



Obrázek 4-11 Zobrazení polarizační elipsy záření mezi vertikální a horizontální osou na výstupu měřicího řetězce zapojeného podle varianty č. 2

Polarizace procházející vlny je sice lineární, nemá však přesně daný směr vektoru šíření vlny. Důvodem je pravděpodobně použití polarizaci nezachovávajícího optického vlákna procházející třílopatkovým kontrolérem. Toto vlákno je z pohledu polarizace velice citlivé na mechanickou a teplotní stabilizaci.



Obrázek 4-12 Změřené normované Stokesovy parametry záření na výstupu měřicího řetězce zapojeného podle varianty č. 2

Změřené hodnoty normovaných Stokesových parametrů (Obrázek 4-12) ukazují časovou nestabilitu stavu polarizace procházející vlny. Důvodem je již zmiňovaná tepelná a mechanická citlivost použitých prvků. Velký podíl na této nestabilitě má mimo jiné také polarizaci nezachovávající EDFA zesilovač.

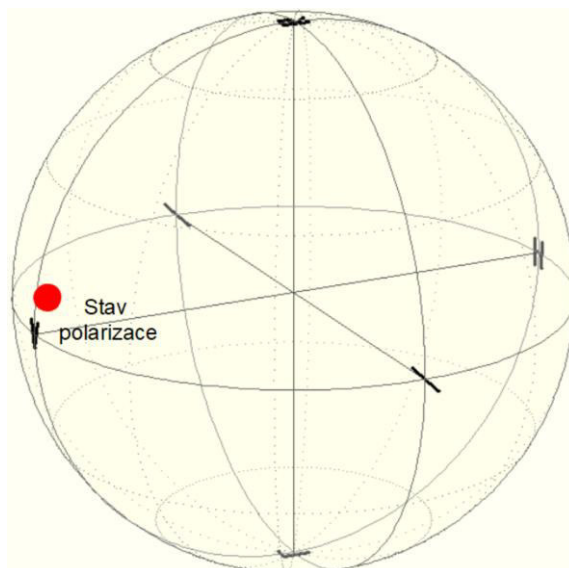
Tabulka 4 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup měřicího řetězce (var. 2)

Budící proud I_{LD}	220 mA
Budící proud EDFA	106 mA
Stupeň polarizace DOP	99,783 %
Azimut	-86,765 °
Eliplicita	-1,075°
Změřený výkon záření	-1,479 dBm

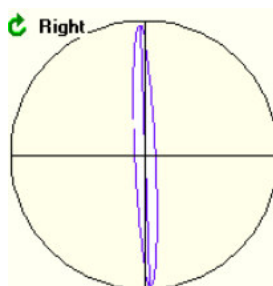
Výsledný stupeň polarizace $DOP = 99,783\%$ je velice dobrá hodnota, avšak dochází k pomalé změně polarizace procházející vlny z lineární na kruhovou a natáčení vektoru směru šíření této vlny. Tento jev je pro potřeby experimentu nežádoucí.

4.6 Výstupní záření získané na měřicím řetězci podle varianty č. 3

Třetí varianta měřicího řetězce je na výstupu EDFA zesilovače doplněná o spektrální filtr, složený z optického cirkulátoru a laditelného filtru typu Braggova mřížka. Vzhledem k faktu, že signál zesílený EDFA zesilovačem nemá stabilizovanou polarizaci, byl k propojení zesilovače a cirkulátoru zvolen SM patchcord, který nezachovává polarizaci. Dalším důvodem této volby je fakt, že laditelný filtr je pevně spojen se stejným SM vláknem. Po filtraci spektrální následuje filtrace polarizační, stejně jako v předchozím zapojení měřicího řetězce.

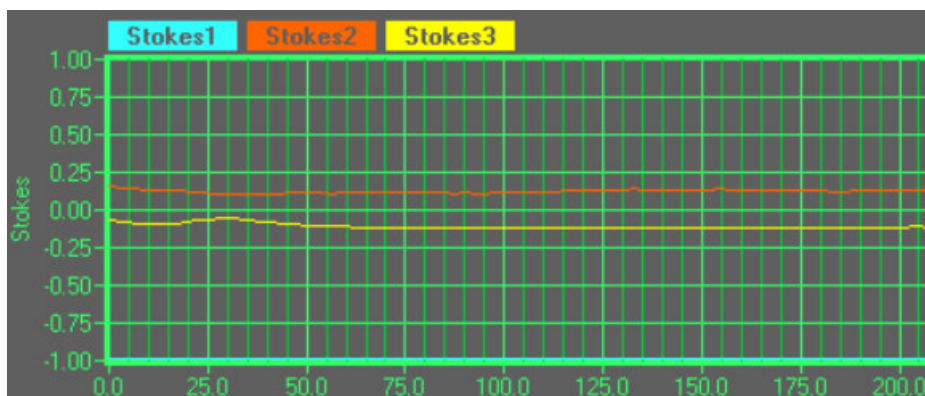


Obrázek 4-13 Zobrazení stavu polarizace výstupního záření 3. řetězce (spektrální i polarizační filtrace) na Poincarého kouli

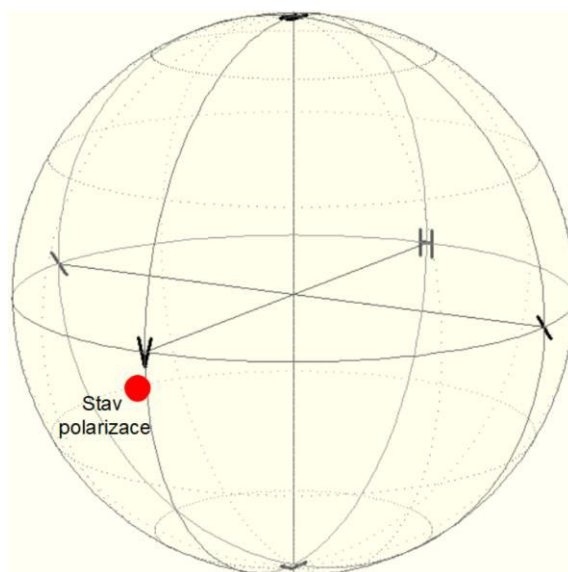


Obrázek 4-14 Zobrazení polarizace záření mezi vertikální a horizontální osou na výstupu 3. měřicího řetězce

Ze zobrazených normovaných Stokesových parametrů (Obrázek 4-15) lze určit, že toto zapojení je v časové ose opět nestabilní z pohledu polarizace záření. Po 30 minutovém měření v uzavřené laboratoři byl pořízen ještě kontrolní snímek stavu polarizace v Poincarého sféře (Obrázek 4 – 16). Z tohoto kontrolního snímku je patrné, že polarizace výstupního záření se změnila, ne však razantně. Mezi hlavní důvody lze jednoznačně zařadit náhodně polarizovaný signál z výstupu EDFA zesilovače a teplotní závislost použitých prvků, zejména laditelného optického filtru.



Obrázek 4-15 Změřené normované Stokesovy parametry záření na výstupu 3. měřicího řetězce



Obrázek 4-16 Kontrolní zobrazení stavu polarizace výstupního záření 3. řetězce na Poincarého kouli

Porovnáním zobrazení stavu polarizace záření na Poincarého kouli po spektrální a polarizační filtraci (Obrázek 4-13), kdy byl stav polarizace vlny dorovnán pomocí třílopatkového kontroléru na požadovanou hodnotu, s kontrolním zobrazením (Obrázek 4-16) lze pozorovat posun vyobrazeného bodu na Poincarého kouli, což značí časovou nestabilitu stavu polarizace procházejícího záření.

Tabulka 5 Hodnoty naměřené polarimetrem – výstup měřicího řetězce (var. 3)

Budící proud I_{LD}	220 mA
Budící proud EDFA	106 mA
Stupeň polarizace DOP	99,874 %
Azimut	-87,307 °
Elipticita	4,862°
Změřený výkon záření	-15,883 dBm

Ze změřených hodnot je patrné, že stupeň polarizace optického záření na výstupu měřicího řetězce (var. 3; obr 3-26) je stále velmi vysoký, což je pozitivní. Vlivem polarizační nestability optického cirkulátoru, laditelného filtru a použitého vlákna v polarizačním kontroléru došlo nejen ke zvýšení elipticity, ale také k poklesu výkonové úrovně na výstupu měřicího řetězce.

Porovnáním výkonových úrovní na výstupech měřicích řetězců zapojených podle varianty č. 2 (obr. 3-25) a podle varianty č. 3 (obr. 3-26) je zřejmé, že spektrální filtr, složený z optického cirkulátoru a laditelného optického filtru, představuje velký vložený útlum. Dalším důvodem poklesu výkonu u zapojení podle varianty č. 3 je použití děliče svazku. Procházející vlna je rozdělena na dvě větve, z nichž využita byla ta větev se změřenou vyšší výkonovou úrovní na výstupu.

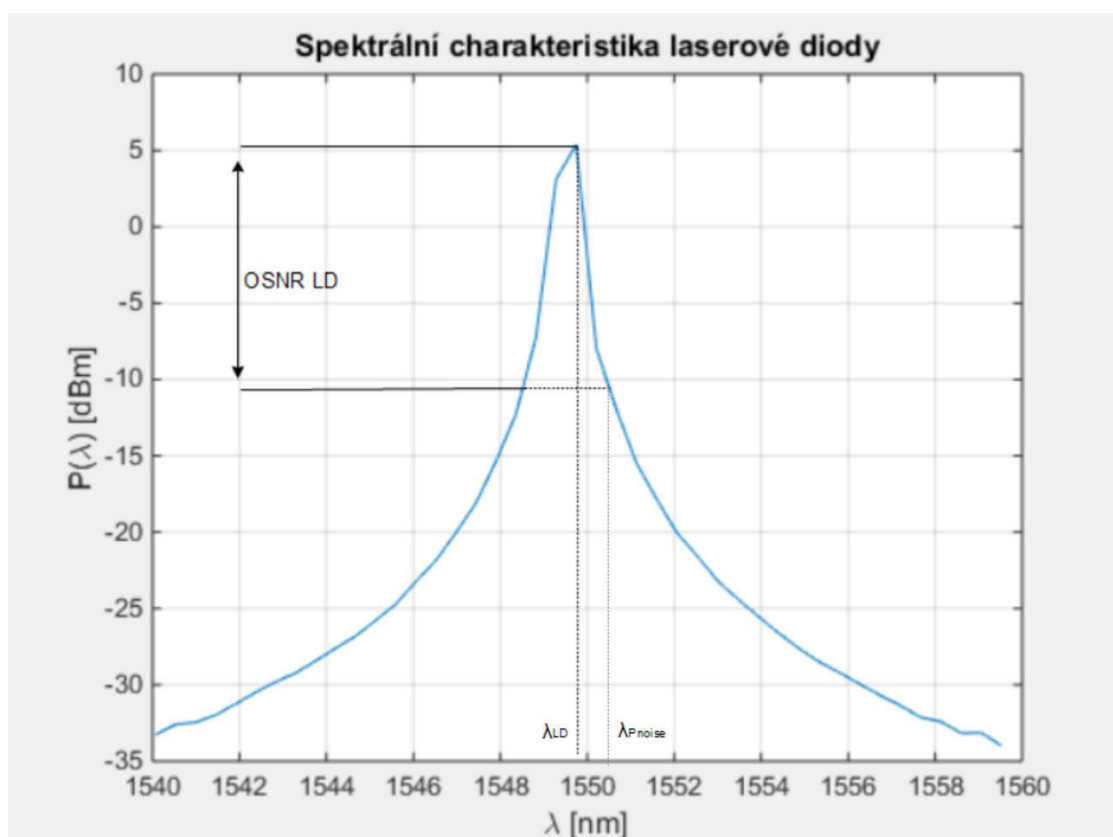
5 MĚŘENÍ SPEKTRÁLNÍCH CHARAKTERISTIK

Pomocí spektrometru Newport MIR8025 byly zobrazeny spektrální charakteristiky laserového záření, z nichž lze určit hodnotu OSNR záření. Jelikož použitý spektrometr nedokáže zobrazit přímo hodnotu výkonu, byl výkon změřen měřičem výkonu (Fiberoptic tester FOT-10A, EXFO) a v prostředí Matlab byly naměřené hodnoty spektrálních charakteristik výkonově kalibrovány. Nejprve byla zobrazena charakteristika samotné laserové diody a EDFA zesilovače. Následně byly zobrazeny změřené charakteristiky na výstupech jednotlivých měřicích řetězců (viz obr. 3-24, 3-25 a 3-26) a ze sestrojených grafů byly odečteny důležité parametry.

Pro úroveň výkonu šumu byla zvolena hodnota odpovídající úrovni odklonu na spektrální charakteristice od délky vlny nosné o 1 nm.

5.1 Záření laserové diody

Pro měření spektrální charakteristiky záření LD byl nastaven budící proud diody na hodnotu 120 mA, stejně jako u měření stavu polarizace. Nízká hodnota budícího proudu byla nastavena z důvodu výkonové ochrany spektrometru.



Obrázek 5-1 Spektrální charakteristika záření LD

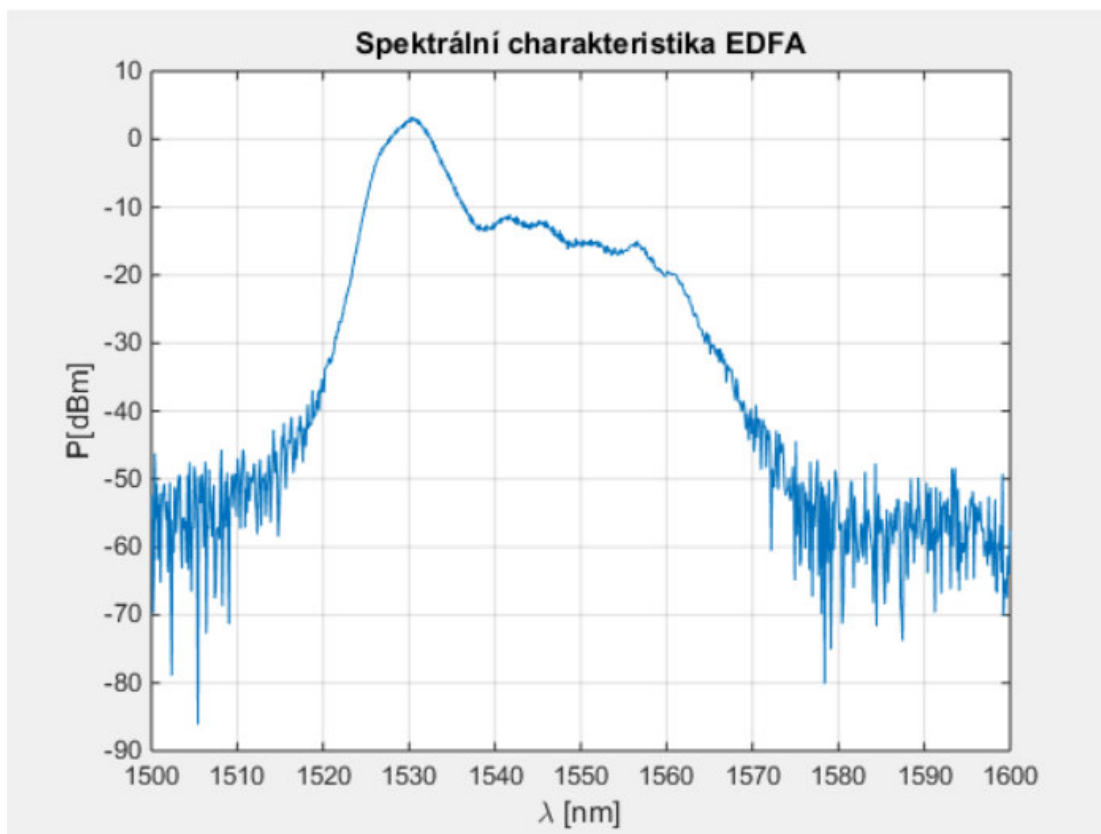
Ze spektrální charakteristiky byly odečteny následující důležité parametry:

- $\lambda_{LD} = 1549,75 \text{ nm}$
- $P(\lambda_{LD}) = 5,39 \text{ dBm}$
- $OSNR_{LD} = 5,39 - (-10,4) = 15,79 \text{ dB}$

Výrobce udaná hodnota vlnové délky laserového záření je v rozmezí 1549,5 nm až 1550,5 nm. Změřená hodnota λ_{LD} je tedy v toleranci udávané výrobcem.

5.2 EDFA zesilovač

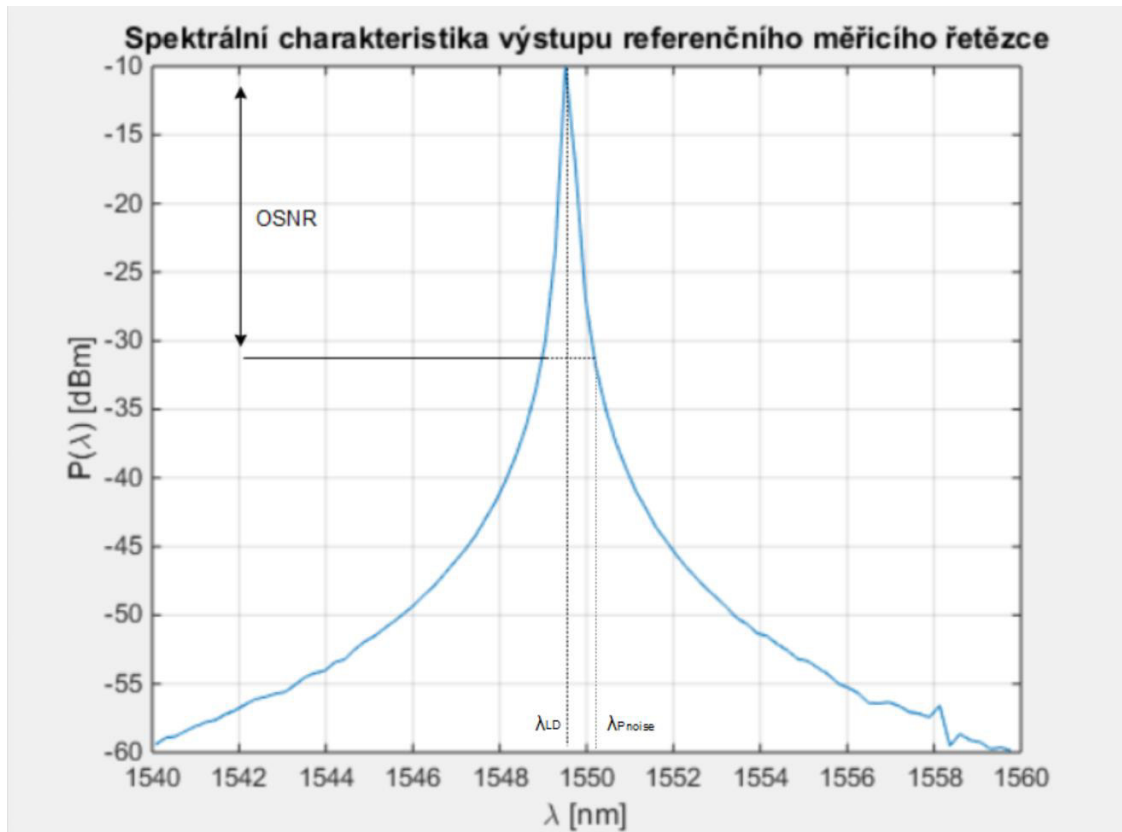
Na EDFA zesilovači byl nastaven budící proud $I_{LD \text{ EDFA}} = 106 \text{ mA}$. Bez přivedeného zesilovaného signálu byl z displeje zesilovače odečten výstupní výkon $P_{\text{out EDFA}} = 3,3 \text{ dBm}$. Výsledná spektrální charakteristika EDFA zesilovače je typická pro tento typ zesilovačů, tudíž tento průběh spektrální charakteristiky byl očekáván. Podle technické specifikace daného EDFA zesilovače byla je pracovní šířka pásma vlnové délky a to od 1529 nm do 1562 nm. Porovnáním těchto hodnot se změřenou spektrální charakteristikou lze soudit, že EDFA zesilovač pracuje správně.



Obrázek 5-2 Spektrální charakteristika samotného EDFA zesilovače (bez zesilovaného záření)

5.3 Výsledky měření na jednotlivých měřicích řetězcích

Jako první byla změřena spektrální charakteristika referenčního měřicího řetězce (viz Obrázek 3-24), kde byla využita pouze spektrální filtrace pomocí laditelného optického filtru typu Braggova mřížka. K propojení prvků referenčního měřicího řetězce byly použity polarizaci nezachovávající SM patchcordy.



Obrázek 5-3 Spektrální charakteristika změřena na výstupu referenčního měřicího řetězce (podle obr. 3-24)

Na výstupu měřicího řetězce byla změřena hodnota výkonu $P_{out} = -10$ dBm. Odečtením hodnot ze spektrální charakteristiky na výstupu referenčního měřicího řetězce byla pro rozšíření spektrální čáry na hodnotu $\Delta\lambda = 1$ nm určena hodnota výkonu $P_{out(\Delta\lambda=1nm)} = -31,81$ dBm. Z těchto hodnot lze určit hodnotu OSNR, která je rovna $OSNR_{ref} = -10 - (-31,81) = 21,81$ dB.

Změřené hodnoty nelze přímo porovnat s hodnotami změřenými na výstupu laserové diody, protože pro samostatné měření laserové diody byl nastaven nižší budící proud.

V zapojení 2. měřicího řetězce bylo k propojení jednotlivých prvků využito polarizaci zachovávajících patchcordů typu panda. Na výstupu EDFA zesilovače bylo vynecháno spektrální filtrování a filtrace byla prováděna pouze polarizační. Spektrální charakteristika výstupu polarizačně filtrovaného měřicího řetězce je znázorněna na Obrázku 5-4.

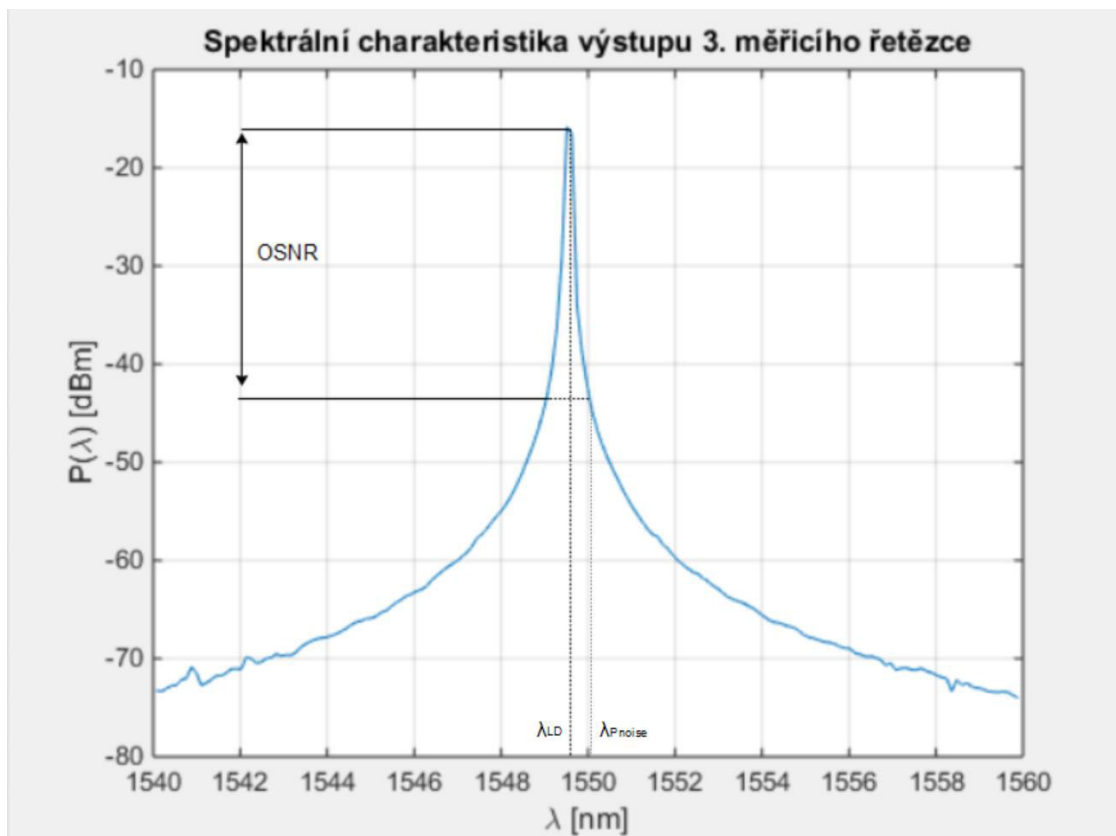


Obrázek 5-4 Spektrální charakteristika polarizačně filtrovaného měřicího řetězce (zapojení podle obr. 3-25)

Hodnota výkonu změřená na konci druhého měřicího řetězce byla rovna $P_{\text{out}} = -1,479$ dBm. Kontrolní zobrazení stavu polarizace výstupního záření 3. řetězce na Poincarého kouli šumu pro rozšíření spektrální čáry $\Delta\lambda = 1$ nm byla pomocí kurzoru odečtena v hodnotě $P_{\text{out}}(\Delta\lambda=1\text{nm}) = -25,71$ dBm. Vypočtená hodnota OSNR pro polarizačně filtrovaný měřicí řetězec je rovna

$$\cdot \text{OSNR}_{\text{pol_filtered}} = -1,479 - (-25,71) = 24,231 \text{ dB}$$

Ve třetí variantě zapojení měřicího řetězce byl za EDFA zesilovač zapojen cirkulátor s laditelným optickým filtrem typu Braggova mřížka, čímž byl výstupní signál filtrován spektrálně. Následná polarizační filtrace byla zachována. Spektrální charakteristika změřená na výstupu třetího měřicího řetězce je na obrázku 5-5.

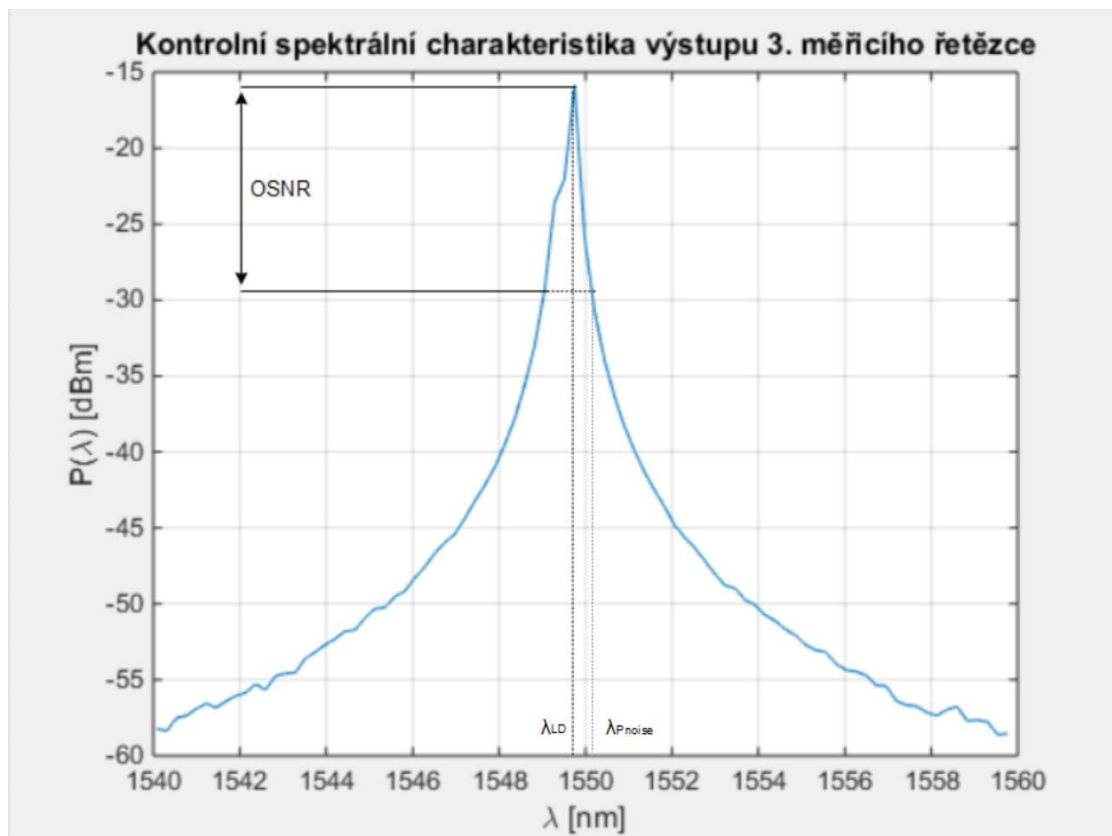


Obrázek 5-5 Spektrální charakteristika spektrálně a polarizačně filtrovaného měřicího řetězce (podle obr. 3-26)

V této spektrální charakteristice stanovenému rozšíření spektrální čáry $\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$ odpovídá výkonová úroveň $P_{\text{out}(\Delta\lambda=1\text{nm})} = -43,34 \text{ dBm}$. Při změřeném výkonu na výstupu měřicího řetězce $P_{\text{out}} = -15,833 \text{ dBm}$ činí hodnota

$$\text{OSNR}_{\text{pol,spectr_filtered}} = -15,833 - (-43,34) = 27,507 \text{ dB}$$

Jelikož polarizace na výstupu měřicích řetězců není časově stabilní, bylo provedeno po 15 minutách opětovné měření výstupní spektrální charakteristiky třetího měřicího řetězce, tedy spektrálně i polarizačně filtrovaného signálu. Tato kontrolní spektrální charakteristika je zobrazena na obrázku 5-6. Dále jsou na obrázku 5-7 pro porovnání zobrazeny spektrální charakteristiky všech tří zapojení měřicího řetězce.

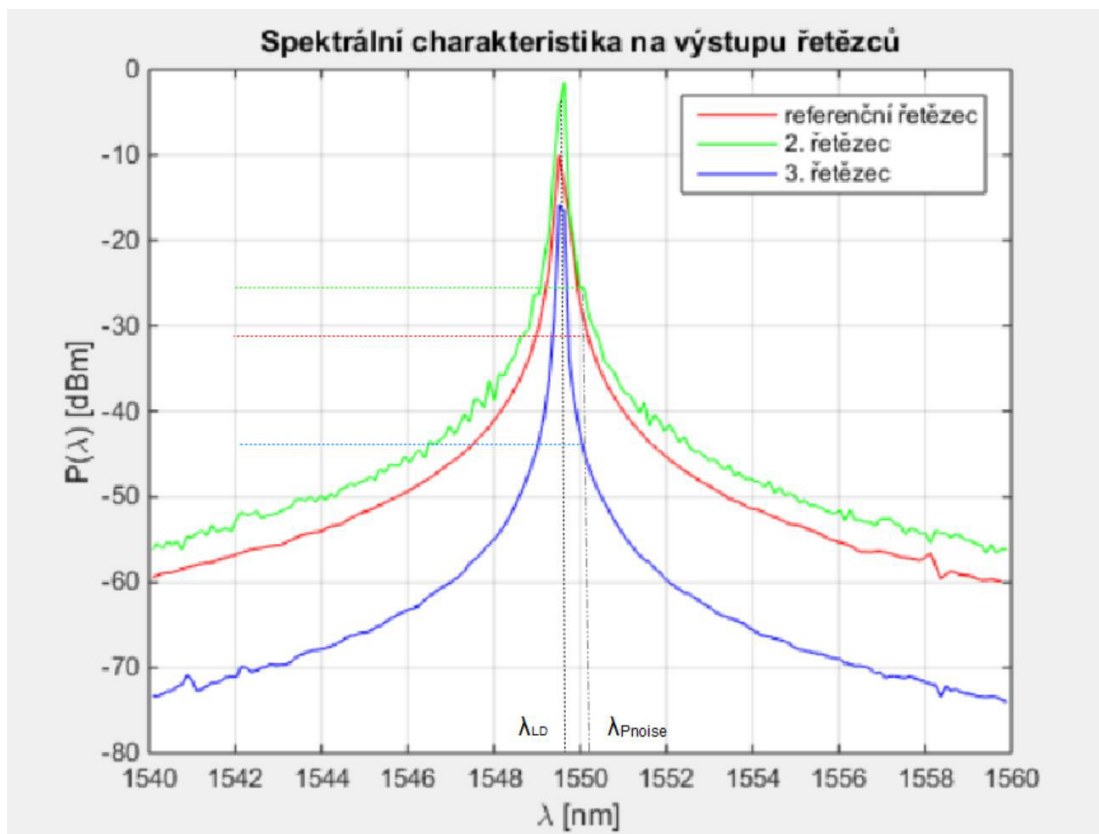


Obrázek 5-6 Kontrolní spektrální charakteristika na výstupu polarizačně a spektrálně filtrovaného měřicího řetězce

Odečtená výkonová hodnota šumu na úrovni odpovídající odklonu o 1nm od délky vlny nosné je rovna -29,39 dB. Potom

$$\text{OSNR}_{\text{pol,spectr_filtered}} = -15,833 - (-29,39) = 13,557 \text{ dB}$$

Porovnáním s předchozí hodnotou OSNR je patrné zmenšení této hodnoty. Toto zhoršení je způsobeno pravděpodobně vlivem několika faktorů. Hlavním důvodem je fakt, že EDFA zesilovač a spektrální filtr nejsou polarizaci zachovávající prvky. Z toho důvodu záření vstupuje do polarizačního děliče svazku s nedefinovanou polarizací. Po průchodu polarizačním filtrem, složeným z polarizačního děliče svazku a třílopatkového polarizačního kontroléru, sice dojde k odfiltrování záření, které nemá požadovanou polarizaci, ale dochází ke kolísání výkonu na výstupu měřicího řetězce. Maximální výkon na výstupu je pouze tehdy, kdy se na vstup polarizačního filtru dostane záření, jehož polarizace odpovídá nastavení polarizace na polarizačním filtru. V případě použitého, polarizaci nezachovávajícího, EDFA zesilovače je tento jev náhodný a zcela neovlivnitelný.



Obrázek 5-7 Porovnání spektrálních charakteristik na výstupech všech tří měřicích řetězců (viz obr. 3-24, 3-25 a 3-26)

Na obrázku 5-7 je možno vidět znatelný pokles šumů v případě zapojení dle měřicího řetězce č. 3, ve kterém je procházející signál filtrován spektrálně i polarizačně. Změřené a dopočítané hodnoty všech měřicích řetězců jsou uvedeny v následující tabulce. Hodnota ΔOSNR byla vypočítána jako $\Delta\text{OSNR} = \text{OSNR}_{\text{var1}} - \text{OSNR}_{\text{var(i)}}$

Tabulka 6 Výsledné hodnoty získané měřením

Měřicí řetězec	OSNR [dB]	ΔOSNR [dB]
Referenční – pouze spektrální filtrace	21,81	-
Polarizační filtrace	24,23	$\text{OSNR}_{\text{var1}} - \text{OSNR}_{\text{var2}} = -3,23$
Spektrální i polarizační filtrace	27,51	$\text{OSNR}_{\text{var1}} - \text{OSNR}_{\text{var3}} = -5,70$
Kontrolní měření spektrální i polarizační filtrace	13,58	$\text{OSNR}_{\text{var1}} - \text{OSNR}_{\text{var3}} = 8,23$

Z těchto hodnot je zřejmé, že při použití polarizační filtrace sice dojde ke zlepšení odstupu signálu od šumu, ale pouze v ideálních podmínkách, tj. hlavně při zajištění teplotní a mechanické stability, zajištění výkonové a spektrální stability LD. Spojením filtrace polarizační s filtrací spektrální dojde k dalšímu zlepšení poměru signálu k šumu. Opět je třeba zajistit mechanickou, teplotní a spektrální stabilitu celého řetězce, navíc je nutné průběžně kontrolovat stav polarizace vlny procházející částí řetězce za EDFA zesilovačem a v případě změny tento stav polarizace dorovnat polarizačním kontrolérem. Kontrolním měřením na měřicím řetězci č. 3 bylo prokázáno, že bez dorovnání stavu polarizace procházejícího záření ke zlepšení odstupu signálu od šumu nedochází.

6 ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce je koncipována jako obecné seznámení s problematikou laserového záření, s hlubším zaměřením na polarizaci záření. V první kapitole je popsáno laserové záření a jeho základní vlastnosti. Kapitola druhá se věnuje polarizaci světelného záření. Je tu popsán vznik polarizovaného záření, popis jeho stavu a dále měření stavu polarizovaného záření. Třetí kapitola je zaměřena na návrh měřicího řetězce, podle kterého má být vyhodnoceno, zda využití polarizační filtrace signálu vede ke zlepšení odstupu užitečného signálu od šumu (OSNR). Navrženy byly tři varianty měřicích řetězců.

První varianta měřicího řetězce neobsahuje polarizační filtraci signálu, pouze spektrální. Jako spektrální filtr slouží optický cirkulátor s laditelným optickým filtrem typu Braggova mřížka. Spolu tyto prvky tvoří pásmovou propust. Laditelný filtr byl naladěn na stejnou vlnovou délku jako výstupní záření laserové diody. V zapojení řetězce podle první varianty nejsou k propojení jednotlivých prvků využity PM vlákna. Signál je před filtrací zesílen EDFA zesilovačem.

Druhá varianta měřicího řetězce, obsahující PM vlákna, naopak neuvažuje filtraci spektrální. Před EDFA zesilovačem je díky polarizátoru přesně určen stav polarizace. Toto polarizované záření je v EDFA zesilovači zesíleno. Z důvodu využití EDFA zesilovače, který nezachovává polarizaci je nutná další filtrace po zesílení. K tomu byl využit polarizační dělič svazku spolu s třílopatkovým polarizačním kontrolérem, jelikož nebyl dostupný druhý vláknový polarizátor.

Ve třetí variantě měřicího řetězce, obsahující PM vlákna, bylo použito stejné spektrální filtrace jako v referenčním měřicím řetězci (první variantě měřicího řetězce). Zesílený signál byl za EDFA zesilovačem nejprve filtrován spektrálně, poté polarizačně.

Pomocí polarimetru byl kontrolován stav polarizace optického záření za vybranými prvky měřicích řetězců (body 1 – 5 ve variantách měřicího řetězce č. 2 a č. 3). Touto kontrolou bylo zjištěno, že záření vystupující z laserové diody je lineárně polarizované, ale směr vektoru definující polarizaci není přesně stanoven ve vertikální nebo horizontální ose. Za laserovou diodou byl připojen pevný atenuátor, který bohužel nezachovává polarizaci procházející vlny. Z těchto důvodů byl použit lineární vláknový polarizátor, na jehož výstupu bylo záření lineárně polarizované a směr vektoru definující polarizaci byl stanoven přesně ve vertikální ose.

Použitý EDFA zesilovač nezachovává polarizaci procházejícího záření, stejně jako spektrální filtr, složený z optického cirkulátoru a laditelného optického filtru typu Braggova mřížka. Kvůli těmto prvkům bylo nutné provádět opakovanou polarizační filtraci. Polarimetrem byl měřen hlavně stupeň polarizace procházející vlny. Tento byl ve všech bodech měření vždy vyšší než 99%. Dalším kontrolovaným aspektem byl stav polarizace optické vlny, který byl zobrazen v Poincarého kouli. Polarimetrem byla také měřena výkonová úroveň signálu ve všech kontrolovaných bodech měření (body 1- 5). Změřené hodnoty výkonu záření na výstupech jednotlivých měřicích řetězců byly následně použity pro sestrojení spektrálních charakteristik. Porovnáním hodnot změřeného výkonu na výstupech jednotlivých měřicích řetězců bylo zjištěno, že nejvyšší výstupní výkon ($P_{out} = -1,479$ dBm) byl dosažen u druhé varianty měřicího řetězce, kde nebylo použito spektrální filtrace.

Důležité závěry lze vyvodit po vyhodnocení spektrálních charakteristik všech měřicích řetězců. Jelikož nebyly měřicí řetězce sjednoceny výkonově, byla pro úroveň výkonu šumu zvolena hodnota odpovídající úrovni odklonu na spektrální charakteristice od délky vlny nosné o 1 nm. Pro každý měřicí řetězec byla poté určena hodnota OSNR. Hodnota OSNR pro záření laserové diody byla změřena $OSNR_{LD} = 15,79$ dB.

Pro referenční měřicí řetězec (var. 1) byla změřená hodnota $OSNR_{var1} = 21,81$ dB. Na výstupu řetězce (var. 2), kde byla prováděna pouze polarizační filtrace, byla hodnota $OSNR_{var2} = 24,23$ dB. Lze tedy tvrdit, že využitím polarizační filtrace došlo ke zlepšení OSNR. Pro řetězec, kde byl signál filtrován spektrálně i polarizačně (var. 3), byla hodnota $OSNR_{var3} = 27,51$ dB. Porovnáním s hodnotou pro referenční měřicí řetězec je patrné, že opět došlo ke zlepšení odstupu signálu od šumu a to o 5,7 dB.

Jelikož bylo v měřicích řetězcích využito i prvků, které nezachovávají polarizaci procházejícího záření, byl celý měřicí řetězec velice citlivý na mechanickou a teplotní stabilitu. Změna teploty a otřesy v laboratoři přispěly ke změně stavu polarizace procházejícího záření na výstupu měřicího řetězce. Velký vliv však měl také EDFA zesilovač, jehož výstupní záření je nepolarizované. Proto bylo provedeno kontrolní měření s odstupem 15 minut a bez dorovnání stavu polarizace. Výsledkem této kontroly je hodnota $OSNR_{control} = 13,58$ dB, což představuje naopak zhoršení OSNR o 8,23 dB.

Dle mého názoru by využití EDFA zesilovače, který zachovává polarizaci procházejícího záření, vedlo ke stabilizaci stavu polarizace na výstupu měřicího řetězce. Využitím PM vláken spolu s polarizací zachovávajícími komponenty by mělo dojít také ke zmenšení tepelné a mechanické citlivosti celého řetězce.

Experimentálním měřením bylo zjištěno, že při využití polarizace pro filtraci optického signálu lze odstup signálu od šumu zvýšit. Při měření byla nejlepší míra zlepšení OSNR o 5,7 dB zjištěna při využití jak spektrální, tak polarizační filtrace.

LITERATURA

- [1] SALEH, B. E. A. *Základy fotoniky*. Praha: Matfyzpress, 1995. ISBN 80-85863-00-6.
- [2] WILFERT, O. *Kvantová a laserová elektronika*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. ISBN 978-80-214-4493-5.
- [3] DERICKSON, D. *Fiber Optic Test and measurement*. Upper Saddle River (USA): Pearson Education, 1997. ISBN10: 0135343305.
- [4] KUMPÁN, V. *Technologie CWDM pro optické bezkabelové spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2012. 82 s., 5 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc..
- [5] *Parametry optických vláken* [online]. [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/06.html>.
- [6] ŤUPA, Martin *Polarizační vidová disperze - PMD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2011. 111 s. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [7] HUANG, Z., WANG, Z. WU*, Ch. *Stress direction measurement based on polarization state in optical fiber using quaternion method*. Beijing: Beijing Jiatong University, School of Science, Institut od Optical Information, 2017.[online]. ISSN: 1943-0655. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8070955/>
- [8] Thorlabs, Inc: *Polarimeter systems, high dynamic range, free-space ad fiber-coupled* [online]. New Jersey [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/catalogpages/Obsolete/2017/PAX5720IR2-T.pdf>.
- [9] DAŠOVSKÝ, J. *Šumové charakteristiky optického signálu zesíleného optickým vláknovým zesilovačem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 50 s., 11 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: prof. Ing. Otakar Wilfert, CSc
- [10] Thorlabs, Inc: *Pigtailed External Cavity (ECL) Single-Frequency Lasers, Butterfly Package* [online]. New Jersey [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=4934&pn=SFL1550P.
- [11] *Spojování optických konektorů* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://staff.cesnet.cz/~michal/vms/APC/>.
- [12] Thorlabs, Inc: *Erbium-Doped Fiber Amplifiers (EDFA)* [online]. New Jersey [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=10680&pn=EDFA100P#10686.
- [13] *Extinkce* [online]. [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: <http://www.wikina.cz/a/Extinkce>.
- [14] Thorlabs, Inc: *In-Line Fiber Optic Polarizers* [online]. New Jersey [cit. 2018-05-12]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5922&pn=ILP1550PM-FC.
- [15] Thorlabs, Inc: *Fiber-Based Polarization Beam Combiners/Splitters, 3 PM Ports* [online].

New Jersey [cit. 2018-05-12]. Dostupné z:
https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=6786.

SEZNAM ZKRATEK

3D	3-dimension, trojrozměrný.
ATT	Attenuator, útlumový článek.
Cirk	Optický cirkulátor
DC	Direct current, stejnosměrný proud.
DGD	Differential group delay, zpoždění impulsu vzniklé vlivem polarizace.
DOP	Degree of polarization, stupeň polarizace.
DR	Driver, řídící obvod.
EDFA	Erbium-doped fiber amplifier, optický zesilovač.
FC/APC	označení optického konektoru.
FC/PC	označení optického konektoru.
LC	levotočivá kruhová polarizace.
LD	Laser diode, laserová dioda.
LH	lineární horizontální polarizace
LV	lineární vertikální polarizace.
OF	optický filtr.
OSA	optický spektrální analyzátor.
OSNR	Optical signal to noise ratio, poměr signálu k šumu v optickém vlákne.
PC	Personal computer, osobní počítač.
PM	Polarization maintaining, polarizaci-zachovávající.
PMD	Polarization mode dispersion, polarizační vidová disperze.
PSP	Principal states of polarization, model polarizačních os.
RC	pravotočivá kruhová polarizace.
SC/APC	označení optického konektoru.
SFP	Small form-factor pluggable, optický konektor
SM	Single mode, jednomodové optické vlákno.
SMSR	Side mode suppression ratio, odstup signálu nosné od nejbližšího modu
SNR	Signal to noise ratio, poměr signálu k šumu.
TIA	Transimpedance amplifier, transimpedanční zesilovač.
USB	Universal serial bus, univerzální sériová sběrnice

Seznam příloh

Příloha 1	EDFA.....	55
Příloha 2	Optický cirkulátor.....	58
Příloha 3	Optický filtr (Braggova mřížka).....	59
Příloha 4	Měřicí řetězec (var.1)	60
Příloha 5	Měřicí řetězec (var.2)	61
Příloha 6	Měřicí řetězec (var.3)	62

Příloha 1 EDFA



TECHNICAL SPECIFICATION TEST RESULTS

PRODUCT MODEL	KPS-CUS-BT-C-10-LN-SM-011-FA-FA
SERIAL NUMBER	9040171



QUALITY CONTROL

Keopsys certifies the above instrument has been inspected in accordance with applicable Keopsys procedures and is conformed to the quality criteria.

QUALITY INSPECTOR: J. Salas

DATE: 27/04/2005

TECHNICAL SPECIFICATION

LASER SETTINGS				
	Min	Nominal	Max	Temperature
Laser Diode Current	60 mA	150 mA	180 mA	25°C

OPTICAL SPECIFICATIONS					
	Min	Typ	Max	Unit	Measurements
Wavelength	1529		1562	nm	Verified
Input Power	-40		0	dBm	
Output saturated power	10			dBm	Verified @ Pin=0dBm
APC Mode	0		10.5	dBm	Verified
Noise Figure			5	dB	4.82dB @ Pin=0dBm
Control Mode	ACC / APC				Verified
Input monitoring	No				
Output monitoring	Yes				Verified
Output isolator	Yes				Verified
Input connector	FC/APC				Verified
Output connector	FC/APC				Verified

ELECTRICAL					
	Min	Typ	Max	Unit	Measurements
AC Voltage	85		264	V	Verified
Power consumption			150	W	Verified
Interface	RS 232 / GPIB				Verified

GENERAL			
	Values	Unit	Measurements
Dimensions	88x448x446	mm	Verified
Storage Temperature	-20 to 55	°C	Verified
Operating case temperature	15 to 35	°C	Verified
Warm up time	<10	min	Verified
In-Out Fiber Type	SMF28		Verified
Input fiber pigtail	Front panel		Verified
Output fiber pigtail	Front panel		Verified

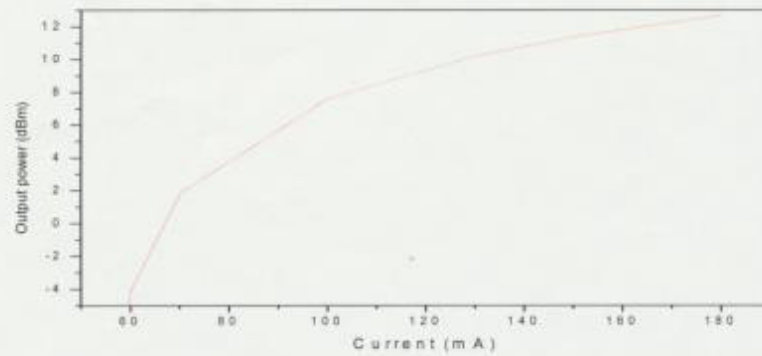
TEST RESULTS

1. OUTPUT POWER VERSUS LASER DIODE CURRENT

Input wavelength (nm) : 1550nm

Input average power (dBm) : 0dBm

Power meter type and serial # : Agilent 81623B (SN:DE41300434)

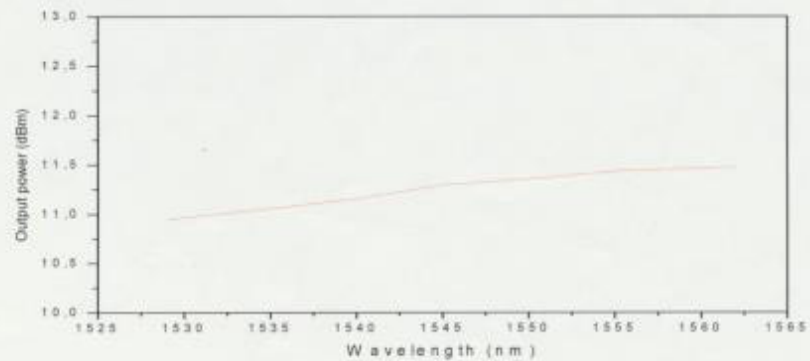


2. OUTPUT POWER VERSUS WAVELENGTH

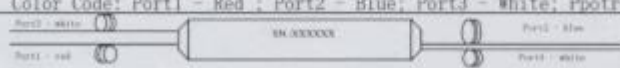
Input average power (dBm) : 0dBm

Laser Diode current (mA) : 150mA

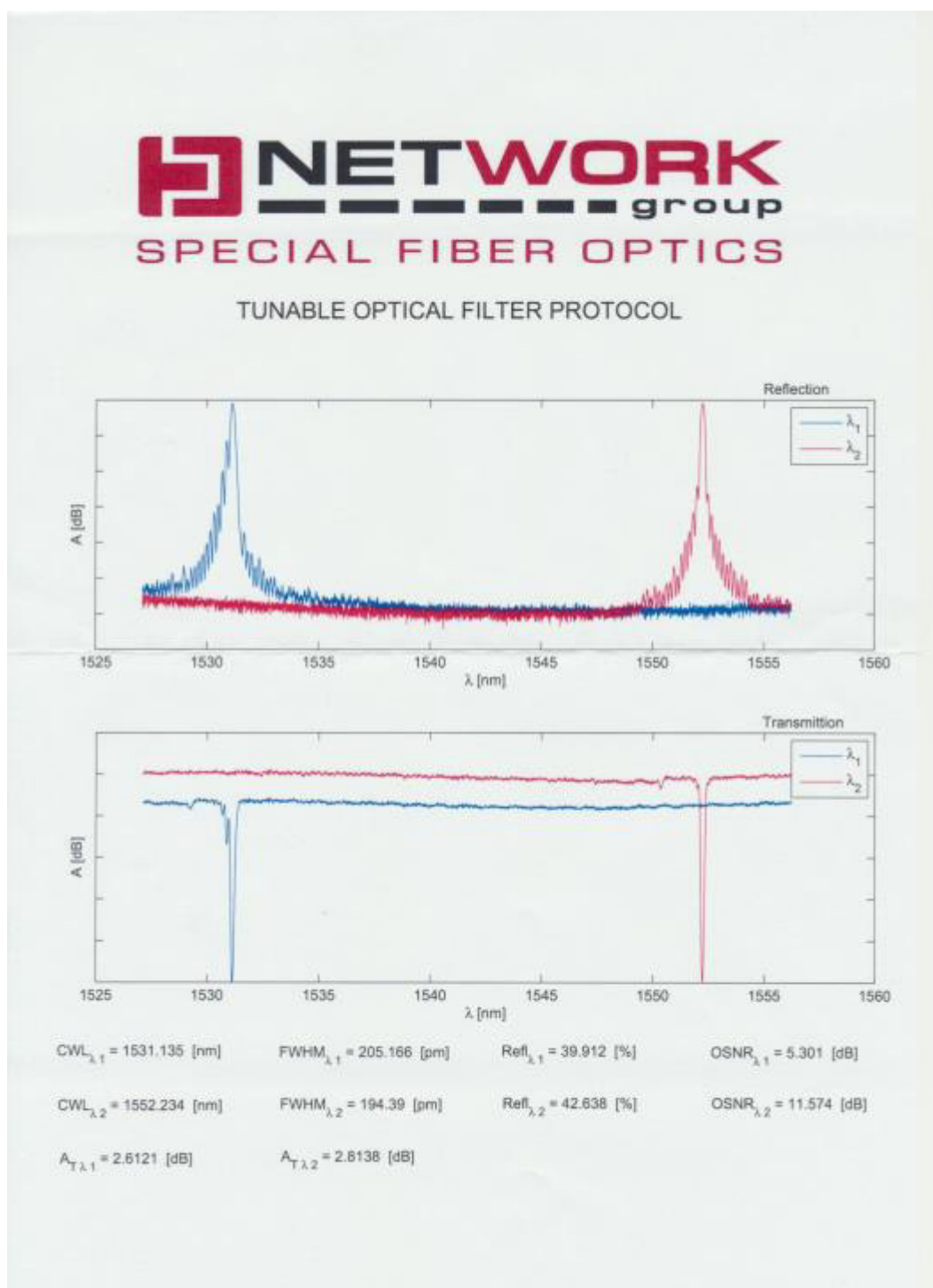
Power meter type and serial # : Agilent 81623B (SN:DE41300434)



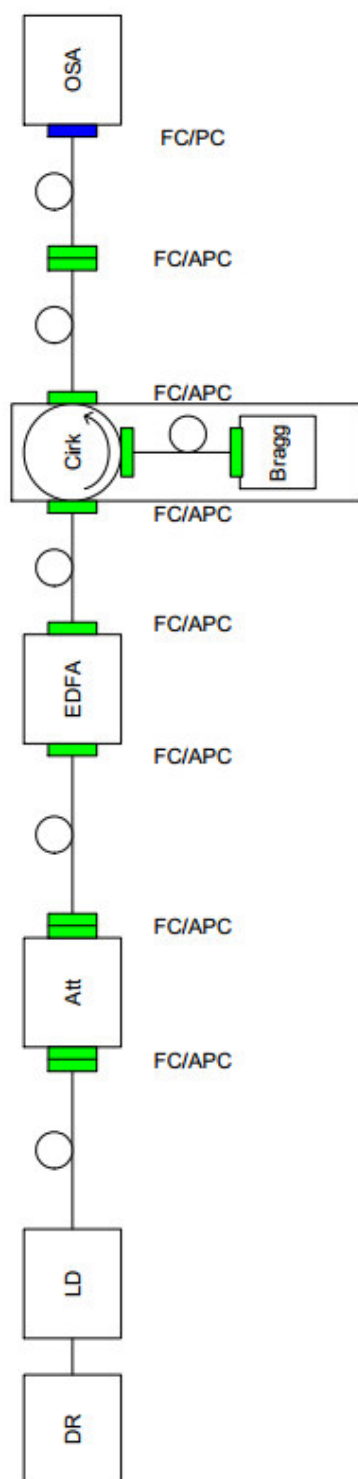
Příloha 2 Optický cirkulátor

Optical Circulator Data Sheet	
Serial No.: 291210682 Date: 2014-12-1	
Operating Wavelength Range(nm)	1550±30
Insertion Loss(dB) [Port1 to port2]	0.81
Insertion Loss(dB) [Port2 to port3]	0.75
Insertion Loss(dB) [Port3 to port4]	0.82
Isolation(dB) [Port2 to port1]	53
Isolation(dB) [Port3 to port2]	53
Isolation(dB) [Port4 to port3]	52
Polarization Dependent Loss(dB) [Port1 to port2]	0.06
Polarization Dependent Loss(dB) [Port2 to port3]	0.09
Polarization Dependent Loss(dB) [Port3 to port4]	0.09
Polarization Mode Dispersion(ps)	≤0.10
Return Loss(dB) [Port1]	60
Return Loss(dB) [Port2]	60
Return Loss(dB) [Port3]	59
Return Loss(dB) [Port4]	59
Cross Talk[Port1 to port3]	58
Cross Talk[Port2 to port4]	56
Optical Power(mW)	300
Fiber Length	1Meter
Operating Temperature	0℃to + 70℃
Storage Temperature	-40℃ to + 85℃
Fiber Type	900um loose tube
Color Code: Port1 - Red ; Port2 - Blue; Port3 - White; Port4 - White	
	

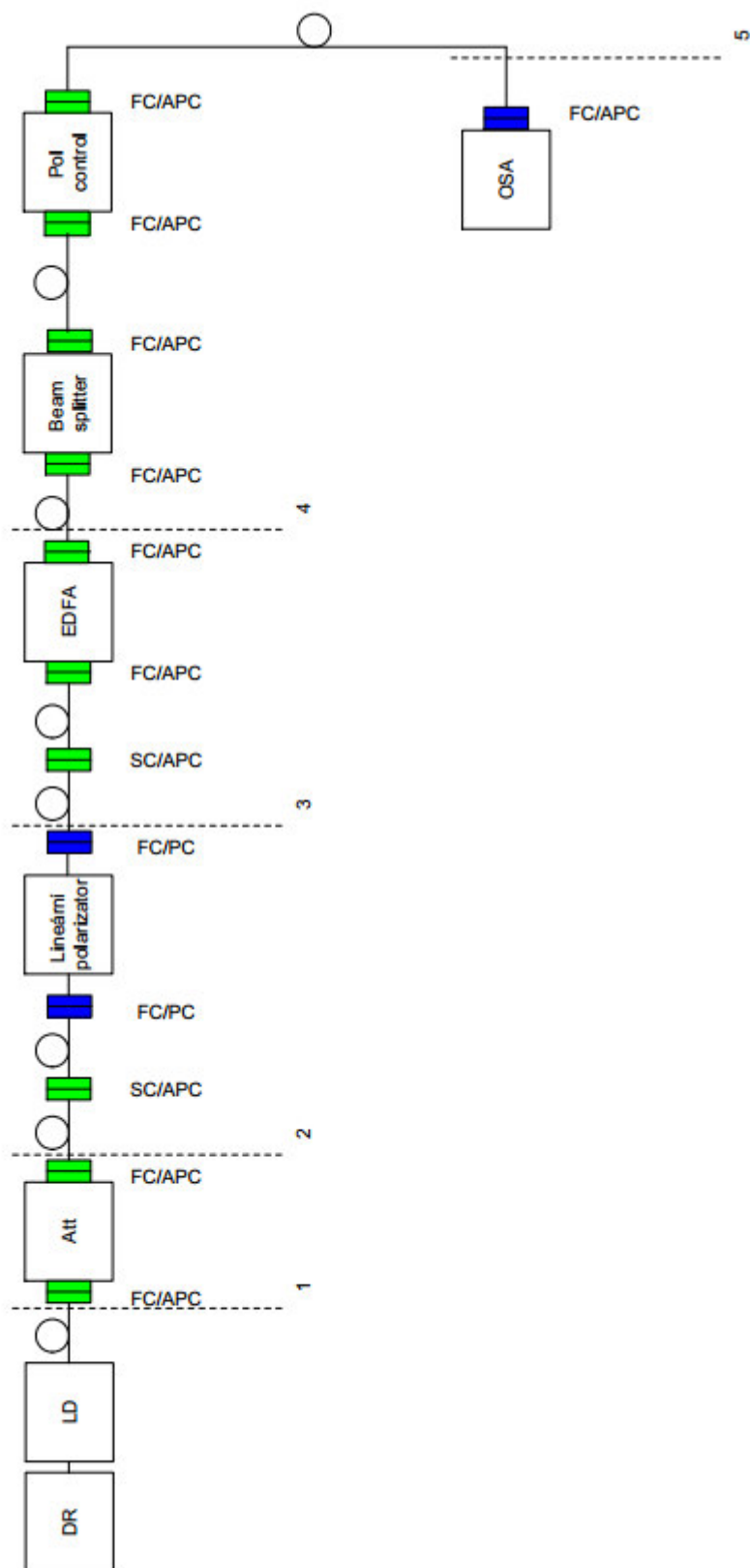
Příloha 3 Optický filtr (Braggova mřížka)



Příloha 4 Měřicí řetězec (var. 1)



Příloha 5 Měřicí řetězec (var. 2)



Příloha 6 Měřicí řetězec (var. 3)

